

## 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ーの実現とその応用

GHz mode-locked pulse laser with simultaneously stabilized optical frequency and repetition rate and its applications

中沢 正隆 (NAKAZAWA MASATAKA)

東北大学・電気通信研究所・教授



### 研究の概要

本研究では、繰り返し周波数をCs共鳴線へ、光周波数をアセチレン ( $C_2H_2$ ) 分子吸収線に同時安定化した高性能な GHz 帯モード同期レーザーを開発する。そして、このレーザー出力を光ファイバネットワークを介して一般に配信するような光 metrology 技術および超高速コヒーレント光通信への応用展開を図る。

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、量子エレクトロニクス、非線形光学、光計測、光制御

### 1. 研究開始当初の背景

繰り返し周波数が 10~40 GHz の短光パルス光源は、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ーの光周波数標準・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。

### 2. 研究の目的

本研究では、光通信波長 1.5  $\mu\text{m}$ 帯において、繰り返し周波数をCs共鳴線(9.1926 GHz)に安定化し、さらに光周波数をアセチレン( $C_2H_2$ )分子吸収線(1538 nm)に同時安定化したモード同期レーザーを世界で初めて実現することを目的とする。さらに、この出力を光ファイバネットワークを介して一般に配信するような光 metrology 技術および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ー (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数によりパルス化する方法である。両者の特性を詳細に評価・検討しながら、理想

的な周波数安定化パルス光源を完成させる。最終的には光ファイバ伝送路を用いたパルス伝送実験により本レーザーの光 metrology および次世代コヒーレントパルス伝送への有用性を明確にする。

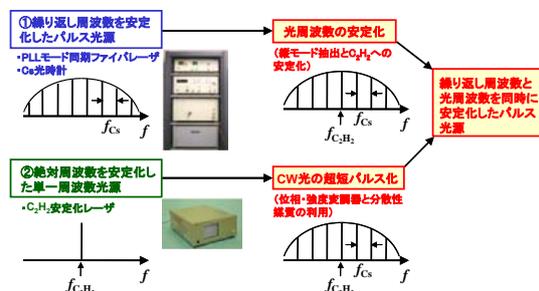


図 1 本研究で開発する同時安定化パルス光源

### 4. これまでの成果

再生モード同期パルスレーザーをベースにしたパルス光源の開発においては、まずレーザーのモードホップを抑制することで光周波数の連続掃引動作を実現し、その後  $C_2H_2$  分子吸収線を用いた光周波数の安定化に成功した。さらに、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をレーザー筐体温度にも負帰還するよう制御回路を改良し、光周波数の長期安定度を大幅に改善することに成功した。本レーザーの周波数安定度を図 2 に示す。図(a)より光周波数安定度は積分時間  $\tau=1$  秒において  $2 \times 10^{-11}$ 、 $\tau=100$  秒において  $7.2 \times 10^{-12}$  であり、参照用光源として用いた周波数安定化

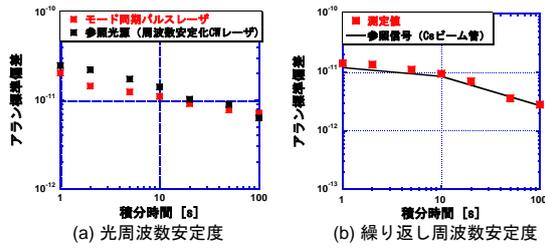


図2 パルスレーザの周波数安定度の評価結果

CW レーザと同等の安定度を達成した。このことより、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、図(b)において、繰り返し周波数安定度の測定値は本測定の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。以上のように、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。

つぎに、周波数安定化CWレーザをベースにしたパルス光源に関する研究成果について述べる。まず、CWレーザからの出力光をLN強度変調器で構成される光コム生成器を用いてRZパルス化する光回路を開発し、繰り返し 10 GHz、パルス幅が 6 ps のフーリエ限界パルスを得ることに成功した。また、周波数安定化CWレーザの低強度雑音化に向けた改良に取り組んだ。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 M/4 シフトDFB半導体レーザを考案し、C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>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。その結果、2.6 kHzの狭線幅特性ならびに-135 dB/Hzの低強度雑音特性を同時に有する周波数安定化CWレーザを初めて実現した。

つぎに開発したパルス光源の応用として、光の振幅と位相に同時に情報を乗せた 32 値の QAM変調をその光パルス信号に適用し、光時分割多重により 400 Gbit/sまで高速化した偏波多重 10 Gsymbol/s, 32 QAM x 4 OTDMデータ信号の 225 km伝送に成功した。32 値の多値変調による 400 Gbit/sの単一チャネル伝送は世界で初めての成果であり、本伝送実験を通じて開発したパルス光源の有用性を明らかにした。さらに、コヒーレントパルス伝送の改良に取り組み、伝送したRZデータを受信部でCWデータに変換し、光S/Nを改善するRZ-CW変換技術を新たに考案した。400 Gbit/s, RZ-32 QAMデータ信号に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 3(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、符号誤り率が  $1 \times 10^{-4}$ 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。そして本技術を用いることでコヒーレントパルス伝送が可能なデータ速度を 400 から 800 Gbit/sに拡大することに成功した。

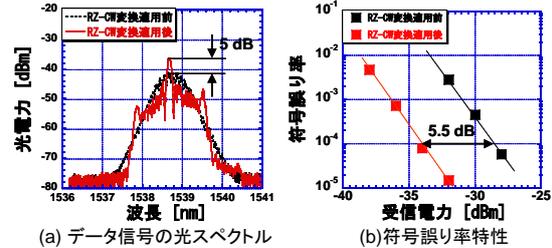


図3 RZ-CW変換適用による復調特性の改善効果

以上のように本研究では、これまでに周波数同時安定化パルス光源の開発とそのコヒーレント光パルス伝送への応用研究に取り組んできている。

## 5. 今後の計画

H23年度までに実現した 2 種類のパルス光源について、そのレーザ部、光周波数安定化部、繰り返し周波数安定化部をそれぞれ筐体に収納し、実用性の高いパルスレーザ装置を作製する。その際、振動や温度変化などの外乱への対策を施した筐体を設計・試作する。また、開発したパルスレーザ装置のパルス幅のさらなる狭窄化を図り、伝送速度が Tbit/s 級の超高速コヒーレントパルス伝送を実現する。さらに、本レーザ装置の計測標準、マイクロ波領域への応用を展開する。光パルス信号の光ファイバ伝送において、特に伝送路の偏波モード分散が標準信号に及ぼす影響に対し留意し、時間・周波数標準信号の長距離配信技術を確立する。

## 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

1. K. Kasai, D. O. Otuya, M. Yoshida, T. Hirooka, M. Nakazawa, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 24, pp. 416-418 (2012).
2. M. Nakazawa, T. Hirooka, M. Yoshida, and K. Kasai, *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 18, pp. 363-376 (2012).
3. M. Nakazawa, K. Kasai, M. Yoshida, and T. Hirooka, *Opt. Express*, vol. 19, pp. B574-B580 (2011).
4. Kasai, A. Mori, and M. Nakazawa, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 23, pp. 1046-1048 (2011).
5. T. Morisaki, M. Yoshida, and M. Nakazawa, *IEICE Electron. Express*, vol. 7, pp. 1652-1658 (2010).
6. 中沢正隆, *応用物理*, vol. 79, pp. 508-516 (2010).
7. K. Kasai, T. Omiya, P. Guan, M. Yoshida, T. Hirooka, and M. Nakazawa, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 22, pp. 562-564 (2010).
8. M. Nakazawa, *Frontiers of Optoelectronics in China*, vol. 3, pp. 38-44 (2010).
9. K. Kasai and M. Nakazawa, *Opt. Lett.*, vol. 34, pp. 2225-2227 (2009).

その他、国際学会発表 14 件、国内学会・研究会 19 件、特許出願 3 件、受賞 4 件

ホームページ等

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