

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420413

研究課題名(和文) 利得変調半導体レーザーのピコ秒時間ゲート機能を利用した応用計測

研究課題名(英文) Application measurements using picosecond time-gate in a gain-switched semiconductor laser

研究代表者

和田 健司 (WADA, Kenji)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40240543

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：利得変調した半導体レーザーに戻り光パルスを帰還する簡易な実験系において、自然放出光の雑音増大現象を利用することにより、利得変調パルスの相互相関情報が高効率に抽出できることを示した。この原理を用いて、高速・高価な受光装置を用いることなく、光ファイバー光学長の精密測定や利得変調半導体レーザーの時間ジッター計測が行えることを実証した。前者は8桁精度を達成し、後者はピコ秒域の時間ジッターを見積もった。

研究成果の概要(英文)：We found that the cross-correlation information of picosecond optical pulses from a gain-switched semiconductor laser could be extracted from the amplified spontaneous emission noise intensity in the delayed optical feedback system. Using the system, a simple method to measure single-mode optical fiber lengths was proposed and demonstrated using a gain-switched 1550 nm distributed feedback (DFB) laser without a fast photodetector or an optical interferometer. The measurement precision reached eight digits. Also using the system, a simple method to measure the timing jitter of a DFB laser or a Fabry-Perot (FP) laser was proposed and demonstrated. The values of timing jitter in the DFB and FP lasers operating under the given pumping parameters were estimated to be 6 ps and less than 1 ps, respectively.

研究分野：レーザー計測

キーワード：半導体レーザー ピコ秒パルス 利得変調 戻り光誘起雑音 時間ジッター 光学距離計測 温度計測

### 1. 研究開始当初の背景

半導体レーザーの利得変調は、光通信分野ではごくありふれた技術であるが、その入出力関係に着目すると興味深く、ナノ秒周期の変調電流入力に対して、数十ピコ秒の時間幅を持つ光パルス出力が発生し、入力より速い出力応答が得られる。これは明らかな非線形応答であるが、歪み分極波による高次非線形現象ではなく、誘導放出が光子（光電界）とキャリア密度の変数同士の積により記述されることによる光と媒質間の相互作用に本質的に内含される非線形性にもとづく現象である。この種の非線形性は基本波で生じるため、効率よく高速現象（ピコ秒光パルス発生）を引き起こすことができる。光パルスを利用する応用計測においては、利得変調した半導体レーザーは、小型・安価・堅牢の観点から簡便な実用的ピコ秒パルス光源として認識されている。

報告者らは、利得変調した半導体レーザーに関連して、低コヒーレンス光による真珠膜厚計測、周期倍発振の観測と制御、自己相関測定を用いない光パルス計測法、光ファイバー干渉計を用いた利得変調パルスの波形整形、バンドフィリング効果を含む半導体レーザーレート方程式の導出の研究を進め、また、派生的に平衡型ファイバサニャック干渉計振動センサー、テラヘルツ波発生のための2波長発振外部共振器レーザー、光スペクトル形状の簡易見積もりに対する研究も行ってきた。

ただし、利得変調ピコ秒パルスの発生メカニズムはQスイッチ法と同じであり、ノイズ光を種光として光パルスが立ち上がるため、時系列に並ぶ前後の光パルス間にコヒーレンスはない。したがって、高価な装置を用いる直接測定を除くと、応用計測は、主に自己相関測定に限られ、スペクトル領域での広がりを利用するものの、時間領域での短いパルス幅という特長はほとんど活用できていないのが現状である。利得変調ピコ秒パルスを最大限利用するためには、安価で高効率な直接測定系を構築するか、インコヒーレントなパルス相互相関計測を確立するかのいずれかとなる。

本研究は、利得変調における高効率な高速応答を発振器としてだけでなく、受光器としても利用できないかという発想から始めた。しかし、光吸収過程では上述の基本波領域での非線形性を発現することは困難である。なぜなら、誘導吸収を記述する2変数のうち、光吸収時のキャリア密度は多数キャリアであり、変動量が少ないため定数と見なされ、受光器としては、光子（光電界）のみの1変数による線形応答（一次遅れ応答）しか期待できないためである。キャリア密度を変数として扱うためには、能動素子として少数キャリアを利用する半導体レーザーを利得変調条件で用いる以外に方法は見当たらない。そこで、利得変調半導体レーザーに光を帰還し、

これを高速な受光器として利用する考えについて検討した。すでに戻り光をもつレーザー系では、光のコヒーレンスによらず、効率よく不安定出力を発生することが知られるため[1]、具体的には、この不安定現象から、計測用途として意味のある信号が取り出せるかについて検討した。

### 2. 研究の目的

本研究では、1台の利得変調した半導体レーザーをピコ秒光パルスの発振器および受光器（の一部）として利用する簡易かつ高効率なピコ秒光パルス送受信システムを構築し、その基礎特性を詳細に調べた上で、特徴を活かした応用計測（光源のジッター計測、光学距離計測等）を提案し、その有用性について実証することを目的とした。

### 3. 研究の方法

研究は、実験と数値計算の両面から進めた。(1) 実験については、図1に示す光学系を基本光学系とした。半導体レーザーを緩和振動周波数付近で利得変調し、そのパルス出力を光カプラーで2分し、可動ミラーを介して戻り光として光源に出力の一部を帰還した。残りのポートからの出力は、低速フォトダイオードに入射して自然放光（ASE）雑音を測定対象として測定した。

(2) 数値計算では、半導体レーザーの利得を記述するレート方程式を導出することから始め、(1)に関連する実験結果に対応する数値シミュレーションを行った。

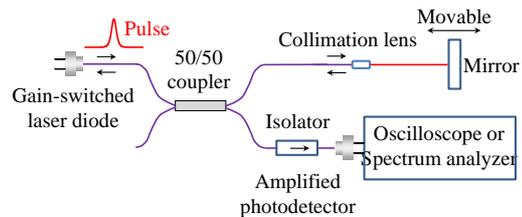


図1 利得変調半導体レーザーへの戻り光帰還基本光学系

### 4. 研究成果

#### (1) ピコ秒時間ゲート特性

ASE雑音強度は可動ミラーの掃引に対して図2に示す左右対称な相関波形が得られた。これは、戻り光パルスによって、レーザー内の誘導放出が擾乱されることによる雑音増大現象にもとづく。励起条件や光帰還割合を変える、または、別光源を利用するなど一連の実験を行った結果、以下のことがわかった。

- i) 得られた波形は、戻り光パルスと共振器内パルスの相互相関波形である。
- ii) 相互相関波形は、時間ジッターの影響で相関幅が広がる。
- iii) 別光源の利得変調パルスを入射した場合も、戻り光パルスと同等の感度で相関波形が描かれる。ただし、両レーザーの

変調周波数と発振波長が一致する必要がある。

- iv) およそ 1 nW ~ 100 nW の戻り光強度範囲に対して, 不安定発振に至らず, 図 2 の雑音増大現象のみ生じる。
- v) 図 2 の相関波形は, 単一モード発振する分布帰還型半導体レーザー (DFB レーザー) と, 多モード発振するファブリーペロ型半導体レーザー (FP レーザー) のいずれも観測される。

以上より, 利得変調半導体レーザーが, 発振帯域の逆数程度の時間幅 (~20 ピコ秒) で外部注入光の情報を抽出する時間ゲート付き光検出器として動作することがわかった。

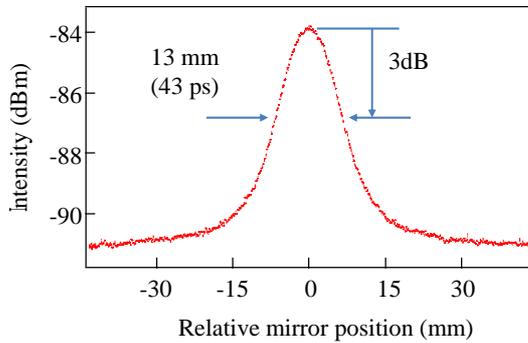


図 2 戻り光の帰還タイミングを掃引したときの ASE 雑音強度変化

## (2) 光ファイバーの光学長精密計測

図 3 に示す実験系を用いて, 長距離 (~1 km) 光ファイバーの光学長計測を行った。この場合, 半導体レーザーの変調周波数 (GPS の精度 ~ $10^{-12}$  で動作) を掃引し, ASE 雑音ピーク強度が観測される周波数より光学長を見積もった。図 3 の実験系に 1 km 光ファイバーを含まないとき, 含むときに, 光源の変調周波数を掃引して得られた ASE 雑音強度変化を図 4 と図 5 にそれぞれ示す。ASE 雑音ピークの出現する変調周波数  $f_m$  と光学長  $L$  の関係は次式となる。

$$L = mc / f_m \quad (1)$$

$c$  は光速,  $m$  は次式を満たす整数である。

$$m = f_m / \Delta f_m \quad (2)$$

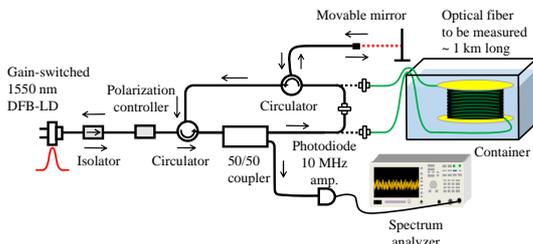


図 3 光ファイバーの光学長測定実験系

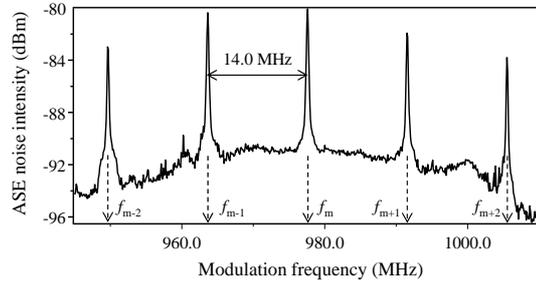


図 4 図 3 の実験系から 1 km 光ファイバーを取り外した系で光源の変調周波数を掃引したときの ASE 雑音強度変化

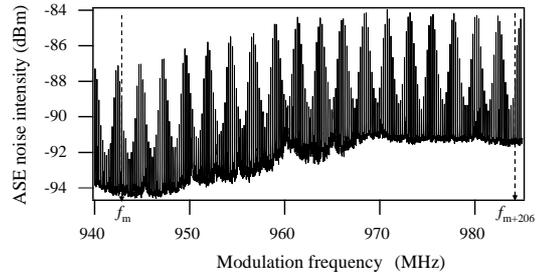


図 5 1 km 光ファイバーを含む図 3 の実験系で光源の変調周波数を掃引したときの ASE 雑音強度変化

ここで,  $\Delta f_m$  は隣り合う ASE 雑音ピークの出現する変調周波数差である。

図 4, 5 の結果を式(2)に照らして,  $m$  の値をそれぞれ 70 と 4902 と見積もった。さらに, 図 4, 5 の  $f_m$  付近で変調周波数を細かく変化させ, ガウス関数フィッティングを施すことにより,  $977582.9908 \pm 0.6963$  kHz,  $943259.88503 \pm 0.01150$  kHz とそれぞれ ASE 雑音ピークを与える変調周波数を得た。これらの値を式(1)に代入することにより, DFB レーザーから再び DFB レーザーに帰還するまでの光学長がそれぞれ,  $21.466691$  m  $\pm$  15  $\mu$ m と  $1492.510606$  m  $\pm$  18  $\mu$ m と求められ, その差分値として, 長距離光ファイバーの光学長は,  $1471.043915$  m  $\pm$  33  $\mu$ m と見積もられた。このことから, 高速な受光器や測定装置を用いることなく, 小型安価な半導体レーザーを光源および受光器の一部として利用することにより,  $2.2 \times 10^{-8}$  の精度 (相対標準偏差の表現) で光学長計測が行えることがわかった。

実験では,  $f_m$  の正確な値を見積もるために必要な測定時間がおよそ 1 分であるため, その間に生じた温度変化が測定精度に影響を及ぼすことも確認した。この観点から,  $10^{-8}$  の精度で測定可能な最長光学長はおよそ 10 km であると見積もった。長距離光ファイバーの光学長測定系は, 温度変化の影響に非常に敏感であることから, この系は高感度温度センサーとしても利用可能であると思われる。

### (3) 時間ジッター計測

これまで、利得変調した半導体レーザーの時間ジッターは、レート方程式にランジュバンノイズを導入することにより数値的に見積もられてきた[2]。しかし、従来のレート方程式は、半導体レーザーに即した利得表現が与えられていなかったことや時間ジッターを位相問題として取り扱わなかったため、スペクトル領域の情報不足が生じたことなどから、時間ジッターに対する理解が十分ではなかった。そこで、本研究では、直接遷移モデルにもとづいて理論的に半導体利得を計算し、各発振縦モードに対応するモード利得は、微分利得定数、透明キャリア密度、キャリア密度利得飽和定数の3個のパラメータによって決定されることを明らかにした。これをレート方程式中に導入し、多モード半導体レーザーに見られる時間ジッターの顕著な抑制効果について詳細に解析した。その結果、多モード発振時の時間ジッターの抑制は、光子数が多いことによるパルスターンオン時間の短縮に起因するという従来の説明は正しくなく、多モード化によりASE光のコヒーレンス時間が短くなることで、時間ジッター抑制の主たる原因であることを見出した。一方、パルス立ち上がり時に存在するASE光ノイズの揺らぎは、多モード発振時の各縦モードの光パルス成分に顕著な振幅ジッターを引き起こすことがわかった。

次に、図3の基本実験系を用いて、利得変調DFBレーザーの時間ジッター計測を行った。光パルス列に時間ジッターが含まれない理想的な場合は、相互相関波形としてのASE雑音増大波形は自己相関波形に一致する。一方、時間ジッターが含まれる場合は、ASE雑音増大波形の半値幅は自己相関幅よりも広がることを予想される。時間ジッターをランダムジッターと仮定し、ガウス関数で表すと、ASE雑音増大波形は、光パルスの自己相関波形と時間ジッターのガウス関数の畳み込み積分で表現される。自己相関波形は、出力光パルスの強度スペクトルを逆フーリエ変換することにより取得できる。これは、時間ジッターの影響は、主に時間軸上のシフトとして現れ、光パルスの時間波形への寄与は少なく、ゆえに、強度スペクトル形状に対する影響もほとんどないことにもとづく。

図6に出力光パルスの強度スペクトルを逆フーリエ変換した自己相関波形(破線、半値幅20 ps)を示す。これに時間ジッターと見なしたガウス関数を作用させ、たたみ込み積分を実行し、得られる相互相関波形がASE雑音増大波形に一致するまでガウス関数の半値幅を掃引した。その結果、半値幅14 psのガウス関数を相関させたとき、図6に示すように両波形の半値幅がよく一致した。これより、与えた励起条件のもとでの利得変調DFBレーザーの時間ジッターはRMS表記で6.0 ps (=  $14/2/(2\ln 2)^{1/2}$  ps)と見積もられた。

次に、DFBレーザーをFPレーザーに置き換

えて同様の実験を行った。利得変調したFPレーザーからは、多モードスペクトルをもつ利得変調パルスが出力された。多モード強度スペクトルを逆フーリエ変換した櫛状の自己相関波形に、観測したASE雑音増大波形を重ねた結果を図7に示す。多モード発振におけるASE雑音増大波形の半値幅(19 ps)は、単一モードの場合(28.5 ps)に比べて短く、また、両波形とも左右対称な山形波形であるが、多モード発振の場合には波形の裾部にリップルが現れた。図7において、波形の中央部では、時間ジッター関数を相関することなく、両波形は半値幅内でほぼ一致し、利得変調FPレーザーには時間ジッターはほとんど含まれない(< 1 ps)ことがわかった。この結果は過去の報告例に一致する[2, 3]。

本手法は、従来測定法ではSH相互相関測定法[4]に大別され、他の測定法[5, 6]とは異なり、高価な高速装置を用いることなく時間ジッターを見積もることができる特長をもつ。また、SH相互相関測定法と比べた場合、非線形光学効果を利用しないため、信号観測が高感度に行えること、強度相関測定ではないため、光ファイバーの分散による光パルスの時間幅広がりの影響を受けないこと、干渉計を構成しないため、光学調整が容易であることなどが利点として挙げられる。一方、本手法は、相関幅の広がりから時間ジッターを見積もるため、SH相互相関測定法と同じく、相関幅の10分の1以下の時間ジッターを見積もることは困難となる。また、戻り光を利用するため、発振の不安定性を引き起こす恐れがあり、戻り光量に注意を払う必要がある。

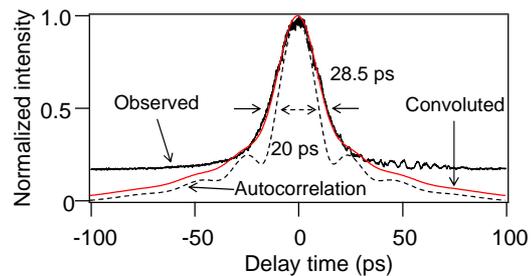


図6 DFBレーザーからの利得変調パルスの自己相関波形(破線)にガウス関数(標準偏差6 ps)を相関させた波形(赤実線)とASE雑音増大波形の実験結果(黒実線)の比較

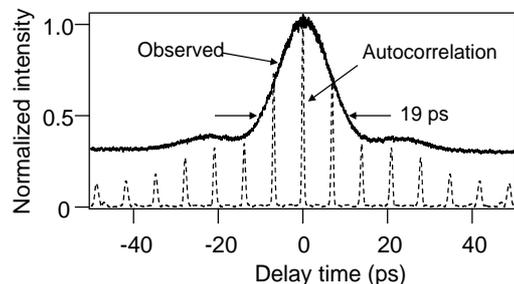


図7 FPレーザーからの利得変調パルスの自己相関波形(破線)とASE雑音増大波形の実験結果(実線)の比較

<引用文献>

- [1] J. Ohtsubo, Semiconductor Lasers—Stability, Instability and Chaos (Springer, Heidelberg, 2013) 3rd ed.
- [2] E. Sano, M. Shinagawa, and R. Takahashi, Theoretical analysis of timing jitter in gain-switched semiconductor lasers, Applied Physics Letters, **55** (1989) 522-524.
- [3] M. Shell, W. Ulz, D. Huhse, J. Kassner, and D. Bimberg, Low jitter single-mode pulse generation by a self-seeded, gain-switched Fabry-Perot semiconductor laser, Applied Physics Letters, **65** (1994) 3045-3047.
- [4] L. A. Jiang, S. T. Wong, M. E. Grein, E. P. Ippen, and H. A. Haus, Measuring timing jitter with optical cross correlations, IEEE Journal of Quantum Electronics, **38** (2002) 1047-1052.
- [5] K. Nonaka, H. Mizuno, H. Song, N. Kitaoka, and A. Otani, Low-time-jitter short-pulse generator using compact gain-switching laser diode module with optical feedback fiber line, Japanese Journal of Applied Physics, **47** (2008) 6754-6756.
- [6] E. Yoshida and M. Nakazawa, Measurement of the timing jitter and pulse energy fluctuation of a PLL regeneratively mode-locked fiber laser, IEEE Photonics Technology Letters, **11** (1999) 548-550.

5. 主な発表論文等

(研究代表者には下線)

[雑誌論文](計 4 件)

K.Wada, N. Kitagawa, S. Matsukura, T. Matsuyama, and H. Horinaka, Timing and amplitude jitter in a gain-switched multimode semiconductor laser, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有り, **55**, 2016, 042702(1-7). DOI:10.7567/JJAP.55.042702

K.Wada, S. Matsukura, A. Tanaka, T. Matsuyama, and H. Horinaka, Precise measurement of single-mode fiber lengths using a gain-switched feedback laser with delayed optical feedback, Optics Express, 査読有り, **23**, 2015, 23013-23020. DOI:10.1364/OE.23.023013

和田健司, 山上雄基, 松山哲也, 堀中博道, 戻り光を利用した利得変調半導体レーザーの時間ジッター計測, レーザー研究, 査読有り, **43**巻, 2015, 371-375.

K.Wada, T. Matsuyama, and H. Horinaka, Simple gain form of 1.5  $\mu\text{m}$  multimode laser diode incorporating band filling and intrinsic gain saturation effects,

Japanese Journal of Applied Physics, 査読有り, **54**, 2015, 032101(1-7). DOI:10.7567/JJAP.54.032101

[学会発表](計 36 件)

北川直昭, 和田健司, 松山哲也, 堀中博道, 利得変調された多モード半導体レーザーにおける時間ジッターの抑制, 第76回応用物理学会秋季学術講演会, 2015年9月14日, 名古屋国際会議場(愛知県名古屋市).

S. Matsukura, A. Tanaka, K. Wada, T. Matsuyama, and H. Horinaka, Precise measurement of optical fiber length using a gain-switched distributed feedback laser with delayed optical feedback, The 11<sup>th</sup> Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim CLEO-PR2015, Aug. 25, 2015, Busan (Korea). 山上雄基, 松倉聖, 北川直昭, 田中天翔, 和田健司, 松山哲也, 堀中博道, 利得変調半導体レーザーの時間ジッター計測に関する数値計算, 第75回応用物理学会秋季学術講演会, 2014年9月18日, 北海道大学(北海道札幌市).

和田健司, 利得変調半導体レーザーからのピコ秒光パルス発生とその応用計測, フォトニクス技術フォーラム H26 年度第2回光情報技術研究会 2014年10月6日, 大阪府立大学会議室(大阪府堺市).

K. Wada, T. Matsuyama, and H. Horinaka, Simple form of multimode laser diode rate equations incorporating band filling and gain saturation effects, 2<sup>nd</sup>-DYCE-ASIA/ISSP-International Workshop on "Life Science and Photonics", Dec. 17, 2013, Univ. of Tokyo, Kashiwa-Campus (千葉県柏市).

松山哲也, 和田健司, 堀中博道, 利得飽和を考慮した半導体レーザーレート方程式の導出, 第74回応用物理学会秋季学術講演会, 2013年9月17日, 同志社大学京田辺キャンパス(京都府京田辺市).

K. Wada, Y. Hono, T. Hashii, Y. Yamagami, T. Matsuyama, and H. Horinaka, Simple method for measuring time-jitter in a gain-switched DFB laser using delayed optical feedback, The 10<sup>th</sup> Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim 2013 (CLEO-PR 2013), July 1, 2013, Kyoto International Conference Center (京都府京都市).

6. 研究組織

(1)研究代表者

和田 健司 (WADA, Kenji)

大阪府立大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 4 0 2 4 0 5 4 3