

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25390093

研究課題名(和文) 面発光型半導体レーザーの周波数雑音特性を用いた物理乱数の超高速生成に関する研究

研究課題名(英文) Fast physical random number generation making use of frequency noise characteristics of a vertical cavity surface emitting lasers

研究代表者

佐藤 孝 (Sato, Takashi)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：10143752

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：面発光型半導体レーザー(VCSEL)の周波数雑音特性をFabry-Perot型半導体レーザーの特性と比較しながら解析し、半導体レーザーの持つ周波数雑音特性を用いた物理乱数の高速生成とその応用研究を進めた。その結果、VCSELは高周波数領域まで広がっている周波数雑音特性を持っているため、物理乱数のより高速生成が可能となることが分かった。この特性を利用した超高速物理乱数の生成の実験的を行い、Fabry-Perot型半導体レーザーでは77Gbit/s、VCSELを用いて120Gbit/sの物理乱数生成速度を実現した。さらに、この乱数生成法を利用したレーザー光距離計測法を考案し、0.5mmの分解能を達成した。

研究成果の概要(英文)：We generated the physical random number by converting a fluctuation of the semiconductor laser's frequency into a change of the optical intensity and digitizing it. We compared the generation speeds of random numbers using the Fabry-Perot type laser diode and VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) and examined the influence of their internal structure. As a result, we generated random number bit strings at 120Gbit/s in VCSEL and at 77Gbit/s in FPLD. The VCSEL's broad line-width enables us to generate random numbers with the greatest efficiency.

However, fluctuations in both atmospheric temperature and the injection current to the semiconductor laser affect the laser's oscillation frequency. Therefore, we improved the stability of generated fast physical random numbers using a semiconductor laser with a stabilized oscillation frequency. We proposed the new Optical Range Finder system used semiconductor laser's frequency noise and obtained the resolution of 0.5mm.

研究分野：光量子エレクトロニクス

キーワード：半導体レーザー 面発光型半導体レーザー 周波数雑音 物理乱数

1. 研究開始当初の背景

半導体レーザーの発振周波数雑音特性が他のレーザーとは異なっていることは、京都大学名誉教授の藪崎等が、原子の吸収線の分光実験に半導体レーザーを用いた際に非常に速い大きな光強度の変動が見られること、そしてこれは半導体レーザーが高速の周波数雑音を持っていることが原因であると報告していることで知られている(Phys. Rev. Lett., 67 (1991) 2453)。一方で、1977年に開発された面発光型半導体レーザー(VCSEL: Vertical Cavity Surface Emitting Laser)は、通常の端面発光型半導体レーザーの変調特性(2GHz程度)に比べてより高い変調周波数(20GHz程度)で変調が可能という特徴を持つ。つまり、藪崎等が行った実験をさらに高い周波数にまで拡張した形で実現することが可能であると期待できる。しかし、この半導体レーザーの周波数雑音特性を利用した応用研究はほとんどなされていない。

研究代表者である佐藤とその研究分担者である大河と大平は、この周波数雑音特性は最近話題になっている半導体レーザーを用いた高速物理乱数生成(例えば、Nature Photonics, 10.1038/nphoton.2008.227)を更に高速化することを可能にすると考えた。また、佐藤等は、Fabry-Perot型半導体レーザーにおいて、その周波数雑音から光強度雑音を生成し、それをA/Dコンバータを用いてデジタル化することで実現できる2進数が物理乱数の性質を持つことを明らかにしてきた(Optical Engineering, Vol.52, No.1, 014302-1~7 (2013))。そして、VCSELを用いてより高速の乱数生成に向けて実験を開始した。

VCSELは、「光出力が小さい、横多モードになりやすい、偏光方向が変動する、発振幅が広い」などの欠点を持ち、応用上で大きな障害となっている。そこで、VCSELの内部構造に手を加えた新しい横シングルモードVCSELや出射側のミラーを作り付けの外部ミラーとすることで特性の改善を図ったVECSEL(Vertical External Cavity Surface Emitting Laser)の開発が進められている。しかし、レーザーそのものの改善と並行してレーザーの使用方法についての検討も重要である。例えば、Fabry-Perot型半導体レーザーの発振周波数安定化は、周波数基準を持ちかつ外部共振器構造を持つシステムで周波数安定化レーザーシステムとして実現されている(例えば、Opt. Lett., 12 (1987) 876 と IEEE J. Quantum Electron., QE-19 (1983) 169)。

通常用いられている光フィードバックを1つ用いる外部共振器型半導体レーザーでは、LLF (Low Frequency Fluctuation) と呼ばれる光フィードバックに起因する光出力の不安定化が外部共振器型半導体レーザーを使用する際の問題となり、外部ミラーに制御を施す必要があった。しかし、2つの光フィードバック系(ダブル光フィードバック)を用いることで、外部ミラーに制御を施さなくても光出力が安定になる条件が存在するという報告がF. Rogister等により1999年になされていた(Optics Letters, 24 (1999) 1218)ので、佐藤等は外部共振器として2つの平面ミラーまたは反射型回折格子を用いるダブル光フィードバック法を採用して発振周波数安定化について研究を進め、Fabry-Perot型半導体レーザーにおいて発振幅の狭窄化と発振周波数安定化を実現した(SPIE, 6468-11 (2007))。

2. 研究の目的

本研究では、これまでの研究を進展させて面発光型半導体レーザー(VCSEL)の広帯域周波数雑音特性を解析し、その特性を用いてVCSELをより広い分野に応用可能なレーザーとすることを目的とする。Fabry-Perot型半導体レーザーは広帯域な変調特性(2GHz程度まで)並びに周波数雑音特性を持つが、VCSELは更に広帯域な変調特性(20GHz程度まで)並びに周波数雑音特性を持つ。これは、VCSELを含む半導体レーザーが比較的狭いスペクトル幅の発振モードが高速に動き回っているからと考えられ、この特性を利用した超高速物理乱数の生成を提案する。また、VCSELに磁界を電流と平行に印加して電流の流れを変化させ、電流の拡散を防ぐことで光出力の増加と短波長側へのシフトを確認した。これを用いた発振波長の制御の可能性についても検討を加えた。

3. 研究の方法

佐藤等はこれまで、半導体レーザーの発振周波数安定化の研究、磁界による半導体レーザーの発振周波数シフトの研究、ダブル光フィードバック法を用いた発振周波数幅狭窄化並びに安定化の研究、半導体レーザーの周波数雑音を用いた物理乱数生成(この研究ではファブリ・ペローエタロン等の周波数弁別器を用いて光周波数雑音を光強度雑音に変換して物理乱数を生成している)の研究を行ってきた。本研究においては実験の対象となるレーザーをVCSELとし、磁界を印加するとともにダブル光フィードバックシステムで周波数特性を制御することを検討した。そして、その周波数の変動並びに発振幅を測定することでVCSELの発振周波数特性を評価する。

また、VCSEL の超高速周波数雑音から Rb 原子の吸収線を用いて光強度雑音を得る。そして、A/D コンバータを通してランダムな 2 進数列を作成しその乱数性を評価し、この方法が超高速物理乱数の生成法として適用可能であることを実証する。

4. 研究成果

本研究課題の期間中に、Fabry-Perot 型半導体レーザ並びに VCSEL の発振周波数安定化の研究、磁界による VCSEL の周波数シフトの研究、ダブル光フィードバック法を用いた VCSEL の発振周波数幅狭化並びに周波数安定化の研究、半導体レーザの周波数雑音を用いた光強度雑音の生成に基づく物理乱数の生成の研究、更には乱数生成の原理から、簡単に測定精度の高いレーザ光距離計測法の研究において、いくつかの発表を行った。

本研究では、研究の対象を広帯域な周波数雑音特性を持つ VCSEL を中心とし、これまでから研究を進めてきた Fabry-Perot 型半導体レーザと比較しながら各々の周波数雑音特性を用いた、「半導体レーザの周波数雑音特性を用いた高速物理乱数生成」を実現した。また、乱数生成を安定に行うために必要な、半導体レーザの周波数安定化について検討を加え、乱数生成の特性を損なうことのない周波数安定化法について様々な角度から実験的に研究を行った(ACEE2015, CA-1-001)。その中には、磁界中に VCSEL を置くことで VCSEL 内の電流密度並びに経路の変動による発振特性の変化を調べた研究(ACEE2014, Paper SS-5-7 (2014))が含まれる。

そして当初の予想通り、周波数雑音が広帯域に広がっている VCSEL を用いることでより高速に物理乱数を生成することに成功した。その乱数生成速度は、Fabry-Perot 型半導体レーザでは 80Gbit/s、VCSEL を用いて 120Gbit/s の物理乱数生成速度の高速化を実現した(ACEE2014, Paper SS-1-8 (2014))。これらの値は、半導体レーザに出力光を戻すことでカオスの雑音を生成する等の方法で半導体レーザの光強度雑音を大きくし、その雑音を用いて高速物理乱数生成を行う方法の生成速度(約 300Gbit/s)には及ばないが、これまでに生成されている半導体レーザを用いない物理乱数の生成速度より、はるかに高速の乱数生成速度である。

更には、この乱数生成の原理から、測定用光路と参照用光路の 2 つの光路を通る周波数雑音を持つレーザ光を、ファブリ・ペローエタロン等を透過させて生成した光強度雑音を用いる「簡単に測定精度の高いレーザ光距

離計測法」を考案した(SPIE Proceedings 9576: Applied Advanced Optical Metrology Solutions, Paper Number 9576-22)。ただ、この方法では、光強度雑音を A/D コンバータでサンプリングする速度で距離測定の精度が制限されてしまい、その分解能は 10GS/s のサンプリング速度で、3cm となる。そこで、その測定精度の改善を観測系に工夫を加えることで実現し、0.8mm の分解能を達成した(平成 27 年度電子情報通信学会信越支部大会 3D-3, 2015)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

1. Beat Signal Generation between Two Rubidium Absorption-Line-Stabilized Diode Lasers in GHz-Frequency Band: Tomoyuki Uehara, Shinya Maehara, Kohei Doi, Toshiya Nimonji, Takahiro Saito, Hideaki Arai, Takashi Sato, Yasuo Ohdaira, Shuichi Sakamoto, Masashi Ohkawa, International Journal of Modern Physics and Applications, Vol.2, No.1, Jan. 2016, Pub. Date: Mar. 4, 2016

〔学会発表〕(計 35 件)

1. Fast physical-random numbers generated using laser diode frequency noise ~Effect of frequency stabilization on random number generation~: Shoya Tsukamoto, Fumihito Karahashi, Takumi Saito, Takashi Sato, CA-1-001, ACEE2015, Nov. 2015, Dalian, China

2. Stable physical random number generation making use of semiconductor lasers' frequency noise characteristics: Mizuha Jimbo, Hideaki Arai, Takashi Sato, Shuichi Sakamoto, Yasuo Ohdaira, Masashi Ohkawa, CC-1-007, ACEE2015, Nov. 2015, Dalian, China

3. Physical-random number generation using laser diodes' frequency noise characteristics: Masatoshi Hasegawa, Ryo Wakabayashi, Kohei Matsumoto, Hideaki Arai, Shinya Maehara, Takashi Sato, Yasuo Ohdaira, Masashi Ohkawa, Shuichi Sakamoto, NGT-15-091, IEEE Shin-etsu Section, Oct. 2015, Nagaoka, Japan

4. Examination of the optical range finder using the frequency noise characteristics of the laser diode: Yuya Tokutake, Takahiro Saito, Kota Ishikawa, Daiki Kawakami, Takashi Sato, Hideaki Arai, Masashi Ohkawa, Yasuo Ohdaira, Shuichi Sakamoto, NGT-15-092, IEEE Shin-etsu Section, Oct. 2015, Nagaoka, Japan

5. Optical range finder using semiconductor laser frequency noise: Takahiro Saito, Katsuki Kondo, Yuuya Tokutake, Shinya Maehara, Kohei Doi, Hideaki Arai, Takashi Sato, Masashi Ohkawa, Yasuo Ohdaira, Shuichi Sakamoto, SPIE Proceedings 9576: Applied Advanced Optical

Metrology Solutions, Paper Number 9576-22, Aug. 2015, San Diego, USA

6. Physical-random Number Generation Using a Semiconductor Laser Diode's Frequency Noise Characteristics -Influence of Lights Source Characteristics-: N. Mizutani, M. Hasegawa, K. Doi^a, S. Maehara, H. Arai, M. Ohkawa, T. Sato, Y. Ohdaira, S. Sakamoto, ACEE2014, Paper SS-1-8 (2014) Kumamoto Univ.

7. Generation of physical random numbers using an external cavity semiconductor laser's frequency noise; an investigation into the influence of narrower oscillation linewidth on the process: S. Sakai, H. Arai, T. Saito, T. Sato, M. Ohkawa, Y. Ohdaira, and S. Sakamoto, ACEE, Paper SS-4-7 (2014) Kumamoto Univ.

8. Magnetic field's effect on VCSEL's oscillation characteristics: O. Iijima, K. Doi^a, T. Sato, and M. Ohkawa, ACEE2014, Paper SS-5-7 (2014) Kumamoto Univ.

9. Examination of an Optical Range Finder using Semiconductor Laser Frequency Noises: K. Kondo, T. Saito, Y. Tokutake, S. Maehara, K. Doi^a, H. Arai, T. Sato, M. Ohkawa, and Y. Ohdaira, ACEE2014, Paper SS-6-8 (2014) Kumamoto Univ.

10. 半導体レーザーの周波数雑音を用いた物理乱数の生成-光源の特性による影響- : 若林瞭, 長谷川真俊, 松本康平, 前原進也, 土井康平, 新井秀明, 佐藤孝, 大平泰生, 坂本秀一, 大河正志, 平成 27 年度電子情報通信学会信越支部大会 3D-1, 2015 年 10 月 3 日, 新潟工科大学, 柏崎市

11. 半導体レーザーの周波数雑音特性を利用した高速物理乱数生成-安定な乱数生成のための周波数安定化- : 唐橋文人, 塚本翔也, 齊藤巧, 新井秀明, 土井康平, 佐藤孝, 坂本秀一, 大河正志, 大平泰生, 平成 27 年度電子情報通信学会信越支部大会 3D-2, 2015 年 10 月 3 日 新潟工科大学, 柏崎市

12. 半導体レーザーの周波数雑音を用いた光距離計測とその分解能の改善 : 石川耕太, 徳嵩裕也, 齊藤高大, 川上大樹, 佐藤孝, 坂本秀一, 大平泰生, 大河正志, 土井康平, 平成 27 年度電子情報通信学会信越支部大会 3D-3, 2015 年 10 月 3 日, 新潟工科大学, 柏崎市

13. 半導体レーザーの周波数雑音特性を利用した高速物理乱数生成用の周波数安定化 : 齊藤巧, 塚本翔也, 唐橋文人, 佐藤孝, 坂本秀一, 大河正志, 大平泰生, 日本物理学会第 44 回新潟支部大会 34, 2015 年 12 月 5 日, 新潟大学, 新潟市

14. 半導体レーザーの周波数雑音を用いた高分解能光距離計測器の開発 : 川上大樹, 齊藤高大, 徳嵩裕也, 石川耕太, 新井秀明, 佐藤孝, 大河正志, 大平泰生, 坂本秀一, 日本物理学会第 44 回新潟支部大会 37, 2015 年 12 月 5 日, 新潟大学, 新潟市

15. 半導体レーザーの周波数雑音を用いた物理乱数の生成 ~ 光源の特性による影響 ~ : 水谷直博, 長谷川真俊, 新井秀明, 前原進也, 土井康平, 佐藤孝, 大平泰生, 大河正志, 坂本秀一, 平成 26 年度電子情報通信学会 LQE 研究会, 小樽経済センター平成 26 年 8 月 21 日 ~ 22 日

16. 半導体レーザーの周波数雑音を利用した光距離計測の検討 : 近藤勝軌, 齊藤高大, 徳嵩裕也, 新井秀明, 前原進也, 土井康平, 佐藤孝, 大平泰生, 大河正志, 坂本秀一, 平成 26 年度電子情報通信学会 LQE 研究会, 小樽経済センター平成 26 年 8 月 21 日 ~ 22 日

17. 磁界印加による面発光型半導体レーザーの発振特性変化 : 飯島音浩, 土井康平, 佐藤孝, 大河正志, 平成 26 年度電子情報通信学会 LQE 研究会, 小樽経済センター平成 26 年 8 月 21 日 ~ 22 日

18. 半導体レーザーの周波数雑音を用いた物理乱数生成の安定性に関する検討 : 神保瑞翔, 新井秀明, 星野恭兵, 佐藤孝, 大平泰生, 大河正志, 平成 26 年度電子情報通信学会信越支部大会 9C-3 信州大学工学部

19. 半導体レーザーの周波数雑音特性を用いた光距離計測法の検討 : 徳嵩裕也, 近藤勝軌, 齊藤高大, 石川耕太, 新井秀明, 佐藤孝, 大河正志, 大平泰生, 平成 26 年度電子情報通信学会信越支部大会 9C-4 信州大学工学部

20. 半導体レーザーの周波数雑音を用いた物理乱数生成 ~ ファブリ・ペロー エタロンを周波数弁別器として用いた基礎実験 ~ : 長谷川真俊, 水谷直博, 籠島尚子, 前原進也, 土井康平, 佐藤孝, 大平泰生, 坂本秀一, 大河正志, 平成 26 年度電子情報通信学会信越支部大会 9D-1 信州大学工学部

21. 半導体レーザーの周波数雑音特性を利用した高速物理乱数生成 ~ 周波数安定化の効果に関する基礎研究 ~ : 塚本翔也, 唐橋文人, 若林瞭, 佐藤孝, 大河正志, 大平泰生, 平成 26 年度電子情報通信学会信越支部大会 9D-2 信州大学工学部

22. 半導体レーザーの周波数雑音特性を用いた光距離計測の検討 : 徳嵩裕也, 清水直弥,

近藤勝軌, 新井秀明, 佐藤孝, 大河正志, 大平泰生, 坂本秀一, 平成25年度日本物理学会新潟支部第42回例会, 新潟大学, 新潟市

23. 磁界印加による面発光型半導体レーザー(VCSEL)の発振波長変化についての研究: 渡邊恭平, 飯島音浩, 河野桂子, 土井康平, 佐藤孝, 大河正志, 平成25年度日本物理学会新潟支部第42回例会, 新潟大学, 新潟市

24. 半導体レーザーの周波数雑音特性を用いた物理乱数生成の検討 発振幅狭窄化が物理乱数生成に及ぼす影響に関する考察 : 酒井 翔太, 古川 元一, 新井 秀明, 齋藤 高大, 佐藤孝, 大河正志, 大平泰生, 坂本 秀一, 平成25年度電子情報通信学会信越支部大会2D-3, 長岡技術科学大学, 長岡市

25. 物理乱数生成のための半導体レーザーの周波数雑音の解析: 水谷 直博, 佐藤孝, 大河正志, 坂本 秀一, 大平泰生, 土井 康平, 前原進也, 近藤 堯信, 長谷川 真俊, 平成25年度電子情報通信学会信越支部大会2D-4, 長岡技術科学大学, 長岡市

26. 磁界印加時における面発光型半導体レーザーの研究 - 発振特性変化のメカニズムの検討 - : 飯島 音浩, 河野 桂子, 土井 康平, 佐藤孝, 鈴木 孝昌, 大河正志, 平成25年度電子情報通信学会信越支部大会2D-5, 長岡技術科学大学, 長岡市

27. 半導体レーザーの広帯域周波数雑音を利用した物理乱数の高速生成: 近藤堯信, 前原進也, 土井康平, 新井秀明, 水谷直博, 佐藤孝, 坂本秀一, 大平泰生, 大河正志, 電子情報通信学会レーザー・量子エレクトロニクス研究会, 2013年8月29日(木) - 8月30日(金) サンリフレ函館

28. 半導体レーザーの周波数雑音特性を用いた物理乱数生成の検討 ~ 発振周波数狭窄化が物理乱数に及ぼす影響に関する研究 ~ : 古川元一, 齋藤高大, 酒井翔太, 新井秀明, 前原進也, 佐藤孝, 土井康平, 大河正志, 坂本秀一, 大平泰生, 電子情報通信学会レーザー・量子エレクトロニクス研究会, 2013年8月29日(木) - 8月30日(金) サンリフレ函館

29. 半導体レーザーの周波数雑音特性を応用した光距離計測の検討: 清水直弥, 前原進也, 土井康平, 新井英明, 佐藤孝, 大河正志, 大平泰生, 坂本秀一, 電子情報通信学会レーザー・量子エレクトロニクス研究会, 2013年8月29日(木) - 8月30日(金) サンリフレ函館

30. 直接変調を用いた半導体レーザーの発振周

波数の安定化とその応用: 松木航平, 二文字俊哉, 塚本翔也, 佐藤孝, 大河正志, 電子情報通信学会レーザー・量子エレクトロニクス研究会, 2013年8月29日(木) - 8月30日(金) サンリフレ函館

31. 半導体レーザーの周波数雑音を用いた光距離計測の検討: 近藤勝軌, 清水直弥, 前原進也, 土井康平, 新井英明, 佐藤孝, 大河正志, 大平泰生, 坂本秀一, 平成25年度 応用物理学会北陸・信越支部 学術講演会 22p-D-4, 金沢工業大学, 金沢市

32. 物理乱数生成のための半導体レーザーの発振周波数の安定化: 神保瑞翔, 古川元一, 新井秀明, 佐藤孝, 大河正志, 大平泰生, 坂本秀一, 平成25年度 応用物理学会北陸・信越支部学術講演会 22p-D-5, 金沢工業大学, 金沢市

33. 直接変調方式による半導体レーザーの発振周波数安定化とTHz波発生への応用: 塚本翔也, 松木航平, 佐藤孝, 大河正志, 平成25年度 応用物理学会北陸・信越支部学術講演会 22p-D-6, 金沢工業大学, 金沢市

34. 半導体レーザーの周波数雑音を用いた測距法: 土井康平, 新井秀明, 前原進也, 齋藤高大, 松浦寛, 佐藤孝, 2013年第74回応用物理学会秋季学術講演会 同志社大学京田辺キャンパス

35. 周波数安定化半導体レーザーによる物理乱数生成システムの構築: 新井秀明, 前原進也, 土井康平, 佐藤孝, 大平泰生, 坂本秀一, 大河正志, 2013年第74回応用物理学会秋季学術講演会 同志社大学京田辺キャンパス

〔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

6. 研究組織

(1)研究代表者
佐藤 孝 (SATO, Takashi)
新潟大学・自然科学系・教授
研究者番号: 10143752

(2)研究分担者
大平 泰生 (OHDAIRA, Yasuo)

新潟大学・自然科学系・准教授
研究者番号： 10361891

大河 正志 (OHKAWA, Masashi)
新潟大学・自然科学系・教授
研究者番号： 90213644