

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 14 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560035

研究課題名（和文） 面発光型半導体レーザ（VCSEL）の特性の改善とその応用に関する研究

研究課題名（英文） Oscillation characteristics improvement of a Vertical Cavity Surface Emitting Laser and consideration to its application

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

研究成果の概要（和文）：

面発光型半導体レーザ（VCSEL）の特性改善を行い、より広い分野に応用可能なレーザとすることを目的として研究を行った。VCSELは通常の半導体レーザと比べてその電流経路が大きく異なる。このため、磁界を電流と平行に印加して電流の拡散を防ぐことで、高いキャリア密度を実現し、光出力の増加そして横シングルモード化を目指す研究を行った。またVCSELは広帯域な周波数雑音特性（20GHz程度）を持つので、吸収線付近でVCSELが発振していると、レーザ光強度が高速でスイッチングされ大きな光強度雑音が観測される。この光強度雑音を8桁のA/Dコンバーターを用いることで生成させた2進数列を物理乱数として利用して、40Gb/sの超高速の乱数生成に成功し、国際会議その他で報告した。

研究成果の概要（英文）：

In the present work, we tested the oscillation wavelength shift of a vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) in a magnetic field, because we expected that the VCSEL would show a shorter wavelength side shift. We also demonstrated a novel method of generating physical random numbers, by means of a diode laser that has an extremely wide-band frequency-noise profile. Fluctuations in the laser frequency affect the intensity of the light transmitted through the optical frequency discriminator, detected thereafter, as random fluctuations. This allows us to simultaneously generate 8 random bit streams, due to the parallel processing of 8-digit binary numbers sampled by an 8-bit analog-to-digital converter (ADC). Finally, we generated physical random numbers at a rate of 40Gb/s.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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

1. 研究開始当初の背景

面発光型半導体レーザ (VCSEL: Vertical Cavity Surface Emitting Laser) は、比較的簡単な系で寿命の長い高速光通信を実現できる可能性を持っている。また、通常の半導体レーザが持つ周波数雑音 (2GHz 程度) よりも更に広帯域な周波数雑音特性 (20GHz 程度) を持つ。この周波数雑音特性は半導体レーザを用いた高速物理乱数生成を更に高速化することを可能にする。しかし VCSEL には、「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」などの欠点があり、応用上で大きな障害となる。

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 の開発が進められている。しかし、レーザそのものの改善と並行してレーザの使用方法についての検討も重要であった。

2. 研究の目的

本研究では、VCSEL の特性改善を行い、より広い分野に応用可能なレーザとすることを目的とする。

具体的には、VCSEL は通常の端面発光型半導体レーザと比べてその電流経路が大きく異なる。このため、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より高いキャリア密度を実現し、その結果として光出力の増加、発振波長の制御そして横シングルモード化を目指す。

また VCSEL は高い変調周波数で変調が可能であり、広帯域な周波数雑音特性 (20GHz 程度) を持つので、この周波数雑音特性を利用して超高速物理乱数の生成を行う。

3. 研究の方法

我々はこれまで、Rb 原子が封入されたガラスセル (Rb セル) による吸収信号 (透過光強度信号) を周波数基準とした半導体レーザの発振周波数安定化を行ってきた。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。

ダブル光フィードバック系は、半導体レーザの発振周波数の安定化と発振幅の狭窄化を同時に実現できる光学系であり、これまで用

いてきた半導体レーザを VCSEL に変更するだけで今回の研究に適用できる。ただ、目的とする特性を得るためには、VCSEL 単体の特性の改善も重要である。

そこで、その周波数特性を測定することで VCSEL の発振周波数特性の改善を評価する。また、VCSEL の超高速周波数雑音から Rb 原子の吸収線または Fabry-Perot etalon を用いて光強度雑音を得る。そして、A/D コンバーターを通して乱数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実用可能であることを実証する。

4. 研究成果

VCSEL の特性改善を行い、より広い分野に応用可能なレーザとすることを目的として研究を行った。VCSEL は通常の半導体レーザと比べてその電流経路が大きく異なる。このため、磁界を電流と平行に印加して電流の拡散を防ぐことで、高いキャリア密度を実現し、光出力の増加そして横シングルモード化を目指す研究を行った。また、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実験も行った。

今回の結果から、VCSEL では磁界を光軸に平行に印加することで注入電流の拡散が小さくなり、磁界が強くなることで活性領域のより多くのキャリアが注入される。これによって、VCSEL の電子とホールとの結合するエネルギーギャップ幅が大きくなることによって図 1 に示すように発振波長は短波長側に、つまり、周波数では高周波数側にシフトすることがわかった。

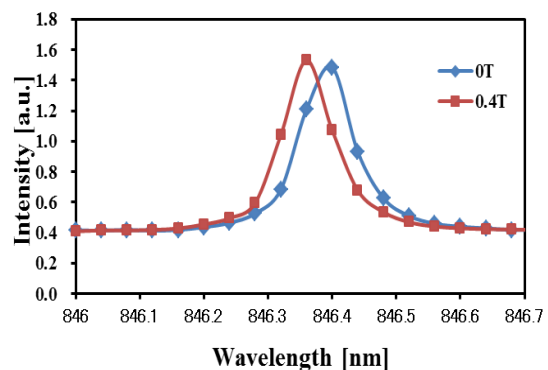


図 1 磁界による VCSEL の波長シフト

また、これまでではファブリ・ペロー型の半

導体レーザを用いて物理乱数の高速生成の実験を行ってきたが、今回は VCSEL を用いて実験を行った。VCSEL は広帯域な周波数雑音特性 (20GHz 程度) を持つので、吸収線付近で VCSEL が発振していると、レーザ光強度が高速でスイッチングされ大きな光強度雑音が観測される。この光強度雑音が物理乱数として利用できるかと我々は考えている。

図 2 に Rb 原子の D₂ 吸収線と我々が乱数生成の基礎実験を行った際の周波数安定化点の位置を示す。

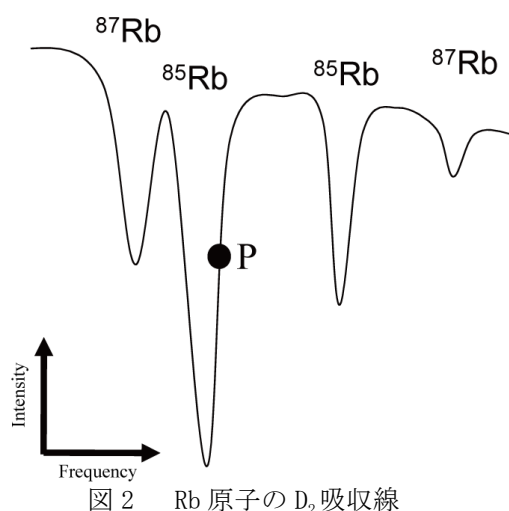


図 3 に Rb 原子の D₂ 吸収線の飽和吸収分光信号の一部と我々が乱数生成の検討を行った半導体レーザの発振周波数の安定化点を示す。吸収線付近で半導体レーザが発振していると、レーザ光強度が高速でスイッチングされ大きな光強度雑音が観測される。

この光強度特性を利用した超高速物理乱数の生成を行った。そして、Fabry-Perot 型半導体レーザを使用して 40Gb/s の超高速物理乱数生成に成功した。これを更に高速化するため、VCSEL を用いて実験を行った。そのためには、VCSEL の発振の中心周波数を安定化が必要である。但し、この際の制御は比較的「遅い」制御のみとして VCSEL の瞬時瞬時の周波数は VCSEL 自身の揺らぎに任せるようにする。これで、VCSEL の発振の中心周波数は Rb 原子の吸収線に一致し、瞬時瞬時の発振周波数はその高速周波数雑音により凡そ数 GHz の範囲で変動するという状況が実現される。その結果、Rb セルが周波数変化を光強度変化に変換する装置の役割を果たし、半導体レーザの周波数雑音から光強度雑音が生成された。この信号を高速の A/D コンバー

ターで 2 進数に変換し、例えばその最下位のビットを集めて 2 進数の列を作るとそれは目的とする物理乱数となる。実験の結果、40Gb/s の超高速の乱数生成に成功し、国際会議その他で報告した。

この光強度雑音を 8 桁の A/D コンバーターを用いることで生成させた 2 進数列を物理乱数として利用して、40Gb/s の超高速の乱数生成に成功した。

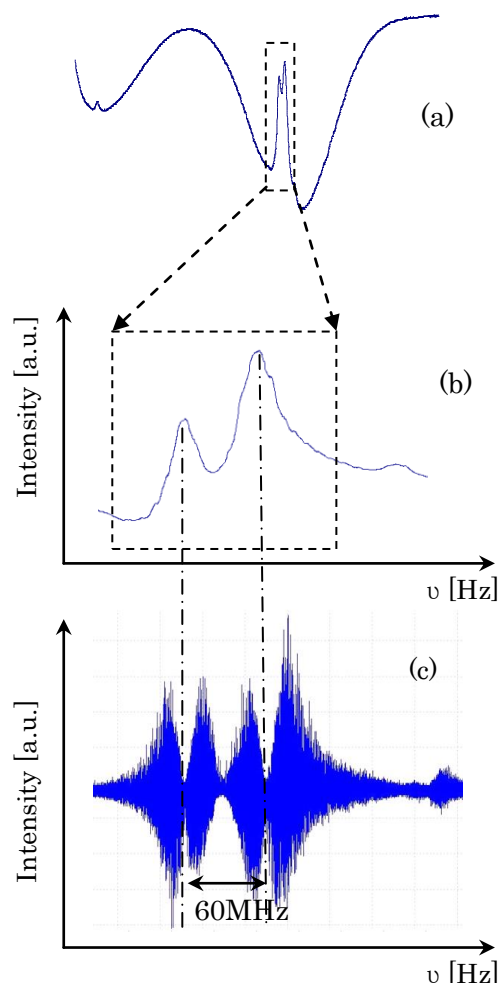


図 3 半導体レーザの周波数雑音から得られた光強度雑音信号
 (a) Rb の飽和吸収分光信号の一部
 (b) 拡大した飽和吸収分光信号の
 (c) ゆっくりと発振周波数を掃引した際に観測される光強度雑音信号

VCSEL を用いた磁界印加による特性改善の実験並びに VCSEL の周波数雑音を用いた乱数生成の実験は成功し、国際会議レベルでの発表を行っている。

今後は、実験データを蓄積し、実験結果の

再現性を確認することで、学会誌に投稿して発表するとともに、半導体レーザーの周波数雑音を積極的に用いて、光計測、光通信、コンピュータシミュレーションなどの分野での新たな半導体レーザーの応用を開拓して行きたい。

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)

[雑誌論文] (計 1 件)

1. Shinya Maehara, Kohei Kawakami, Hideaki Arai, Kenji Nakano, Kohei Doi, Takashi Sato, Yasuo Ohdaira, Shuichi Sakamoto, Masashi Ohkawa: “Frequency noise characteristics of a diode laser and its application to physical random number generation” Optical Engineering, Vol. 52, No. 1, 2013, 014302-1~7
doi: 10.1117/1.OE.52.1.014302. (査読有)

[学会発表] (計 33 件)

1. Y. Minamisawa, T. Sato, M. Ohkawa, K. Nakano, T. Nimonji: “THz wave generation using frequency stabilized laser diodes,” Proceedings of SPIE [Photonics West 2012 (San Francisco, CA, USA)], 8255巻, 82551L (2012). (査読有)

2. M. Iwahori, K. Doi, H. Arai, T. Sato, M. Ohkawa, Y. Matsumoto: “Oscillation frequency stabilization and narrowing of a laser diode by using an external cavity,” Proceedings of SPIE [Photonics West 2012 (San Francisco, CA, USA)], 8255巻, 825529 (2012). (査読有)

3. H. Takamori, K. Doi, S. Maehara, K. Kawakami, T. Sato, M. Ohkawa, Y. Ohdaira, S. Sakamoto: “Fast random-number generation using a diode laser’s frequency noise characteristic,” Proceedings of SPIE [Photonics West 2012 (San Francisco, CA, USA)], 8255巻, 825521 (2012). (査読有)

4. Y. Yamagishi, T. Sato, M. Ohkawa, S. Tabira: “Oscillation wavelength shifts of vertical cavity surface emitting lasers exposed to magnetic fields,” Proceedings of SPIE [Photonics West 2012 (San Francisco, CA, USA)], 8255巻, 825522 (2012). (査読有)

5. T. Kobayashi, Y. Yamagishi, H. Arai, Y.

Matsumoto, T. Sato, M. Ohkawa: “Oscillation frequency shifts observed in vertical cavity surface emitting lasers exposed to magnetic fields”, Proceedings of SPIE [Photonics West 2011 (San Francisco, CA, USA)], 7933巻, 7933-58 (2011)

6. T. Ushiki, K. Doi, S. Maehara, T. Sato, M. Ohkawa, Y. Odaira: “Super fast physical-random number generation using laser diode frequency noises,” Proceedings of SPIE [Photonics West 2011 (San Francisco, CA, USA)], 7933巻, 79332F, 6頁 (2011). (査読有)

7. 川上航平・前原進也・土井康平・新井秀明・近藤堯信・清水直弥・佐藤孝・坂本秀一・大平泰生・大河正志: Physical-Random Number Generation Using a VCSEL’s Frequency Noise Characteristic、電子情報通信学会信越支部大会・IEEE 信越支部セッション 講演番号 10A-4 平成 24 年

8. Takahiro SAITO, Genichi FURUKAWA, Hideaki ARAI, Takashi SATO, Shuichi SAKAMOTO, Masashi OHKAWA: Physical-random number generation using laser diode’s noise characteristics—Consideration about the influence of laser diode’s oscillation frequency stabilization—, 平成 24 年 電気情報通信学会信越支部大会 IEEE セッション 161

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

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

大平 泰生 (OHDAIRA YASUO)
新潟大学・自然科学系・准教授
研究者番号：10361891