

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：13301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26790056

研究課題名(和文)2次元微小共振器を利用した微小レーザカオス素子の開発と高速物理乱数生成への応用

研究課題名(英文)A compact laser chaos device with a two-dimensional microcavity structure and its application to fast random bit generation

研究代表者

砂田 哲 (Sunada, Satoshi)

金沢大学・機械工学系・准教授

研究者番号：10463704

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、2次元微小共振器を用いたサブミリサイズのレーザカオスデバイスを開発し、その物理乱数生成応用を検討した。主な成果は、次のとおりである。(1)光を周回遅延させる環状型2次元微小共振器を有するレーザデバイスを設計・試作し、周波数帯域が約1 GHzのレーザカオス信号の生成に成功した。(2)また、そのレーザカオス出力を0.78 GHzの間隔でサンプリングしたデータから生成したビット列がDiehardテストの全ての項目に合格することを示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed a sub-mm² sized laser chaos device with a two-dimensional microcavity structure for random bit generation. The main results are summarized as follows: (1) A laser device with an annular microcavity for delayed optical feedback was designed and fabricated. The laser device successfully generated chaotic outputs with a bandwidth of approximately 1 GHz. (2) The bit sequences that were generated from the chaotic outputs sampled at 0.78 GHz passed a standard statistical test suite for randomness, the Diehard test.

研究分野：光工学・光量子科学

キーワード：微小共振器 カオス 物理乱数

1. 研究開始当初の背景

通信セキュリティ技術の開発が急速に進む昨今、予測不能な乱数列の高速生成が可能で且つ機器への搭載が可能なほど小型な物理乱数生成器の開発が、喫緊かつ重要な課題となっている。しかし、ソフトウェア等を使って生成される疑似乱数は原理的に予測可能なものに過ぎない。一方、熱雑音等を利用した乱数生成器が開発されているが、その速度は極めて低いという欠点があった。

そのような状況において、最近、光の不規則現象(レーザカオス現象)を用いた物理乱数の高速生成法が提案された。それ以降、乱数の更なる高速生成法が世界的に研究されるようになった。しかし、乱数生成に適した高速レーザカオス現象を発生させるためには長い光遅延を与える外部共振器が必要不可欠であるが、従来研究のシステムでは、外部共振器を光ファイバやレンズ等の光学コンポーネントを用いて構成していたため、サイズが大きく実用的ではなかった。また、乱数生成の予測不能性の保証は、乱数生成器の信頼性の観点から大変重要であるが、それに関する研究は殆どなされていなかった。そこで、これらの問題を克服すべく、微小光デバイスとそれを用いた完全ランダムな乱数の高速生成法に関する研究を行ってきた。

一方、2次元的に光を微小領域に閉じ込める2次元微小共振器に関する研究も並行して行ってきた。2次元微小共振器の特長の一つは、共振器形状の工夫により、微小領域内で光路を折りたたみ、長い光路を形成できることである。よって、2次元微小共振器を外部共振器として用いれば、従来システムのように長い外部共振器を必要とせず、遅延戻り光によりレーザを不安定化させ、カオス現象を発生できると期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、上述の2次元微小共振器による光遅延法を実装したサブミリサイズの光集積デバイスを設計・試作し、それが物理乱数生成に適した高速レーザカオス現象を発生できることを明らかにする。

3. 研究の方法

本研究で提案した2次元外部共振器の概略を図1に示す。全体の大きさは350μm×720μm以内である。図中の左側の共振器は、疑似スタジアム型レーザ共振器であり、端面ミラーの曲率と共振器長との関係により、ガウシアンビームモードを形成するように設計した。右側が、疑似スタジアムレーザの出射光を再びレーザに戻すように設計した環状型2次元共振器である。共振器端がレンズとして働くように設計しているため、疑似スタジアム型共振器からの入射光は回折広がなく伝搬できる。なお、図中の共振器パラメータにおいて、上述のガウシアンモードを効率的

に結合でき、更に、(往復)経路長が約5.6mm(共振器直径の約19倍)になるよう設計している。この往復長は、戻り光カオスを発生させるに十分な長さである。

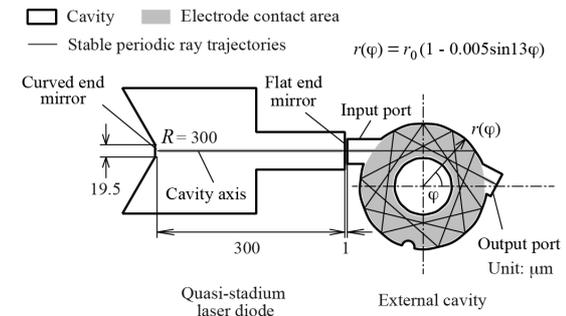


図1. 本研究で提案するレーザカオスデバイスの概略図。疑似スタジアム型レーザ(左)の出射光は環状2次元共振器中で全反射しながら周回し、再びレーザに戻すように共振器形状を設計。

このデバイスをGaAs/AlGaAs屈折率分布型分離閉じ込め単一量子井戸構造のウェーハに作製した。

レーザ出力の強度変動はARコーティングしたレンズドマルチモードファイバに結合し、帯域16GHzのデジタルオシロスコープにて測定した。

乱数生成実験では、取得したレーザ強度波形を、ある閾値と比較し、ビット列に変換する最も単純な方法を採用した。本実験では、8ビットのデジタルオシロスコープを利用したため、ビット生起確率を0.5にするよう閾値を調整することは困難であった。そこで、独立に取得した2つの光強度波形から変換したビット列に対して、排他的論理和をとることで、生起確率0.5に近いビット列を得ることにした。

4. 研究成果

本研究で得られた主な成果を、次の(1)~(3)に述べる。

(1) 環状2次元共振器を利用した長光路形成の実証

疑似スタジアム型レーザを発振させ、環状型2次元共振器を発振閾値以下で励起した条件下にて、遠視野像を測定し、設計通りの放射パターンが得られることを確認した。また、同じ励起条件下にて、疑似スタジアム側からの出力光のスペクトルを測定したところ、結合した2つの共振器長に対応するピークを確認した。以上の結果より、疑似スタジアム型レーザと環状2次元共振器はうまく結合できており、環状2次元共振器において設計どおりに戻り光を生成可能な外部共振器として動作することがわかった。

なお、ガウシアン光学理論によれば、環状2次元共振器の端面形状をより微細にするこ

とで、更に長い光路を形成できる(光路の長さは限界値は、光波長、端面形状の特徴的な変動スケール、共振器の安定性等によって決定される。)また、環状2次元共振器を複数結合すれば、更に光路を長くすることもできる。これは、本研究の主題である乱数生成器応用だけではなく、長い光路や光遅延を必要とする応用(センサや光情報処理)にも適用可能である。2次元共振器を用いた光路形成の展開は、今後の課題である。

(2) 環状2次元外部共振器を利用したレーザカオスの生成と乱数生成特性の解明

次に、出力光強度のダイナミクスを調べた結果、環状2次元共振器部への注入電流の増加に伴い、定常発振状態、リミットサイクル発振状態、間欠カオス、そしてカオスへ遷移することを明らかにした。特に、2次元微小共振器を発振させ、戻り光による不安定化だけでなくレーザ間の非線形結合の効果を発現させた場合に、3dB帯域が約1GHz、レーザノイズに比べて最大で約20dB大きい振幅のカオス変動(図2)を発生することを明らかにした。

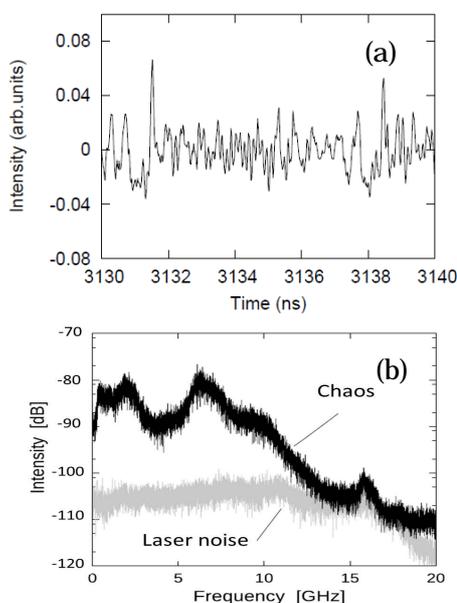


図2. (a) 図1のレーザデバイスで生成したカオスダイナミクス. (b) (a)のパワースペクトル.

次に、「3.研究手法」で述べた方法にて、カオス信号をビット列に変換した。なお、カオス信号から相関のないビット列を得るために、サンプリング時間間隔は、カオス信号の自己相関関数が十分に減衰する約1.3 nsとした(サンプリングレートは約0.78 GHzとした)。生成された約100Mビットの乱数列に対して、18種類の統計テストから構成されるDiehardテストを実施したところ、有意水準0.01で全ての検定に合格することを確認した。この結果は、2次元微小共振器がレーザカオスだけでなく小物理乱数生成デバイス

として有効であることを示唆している。

(3) カオス共振器及び非カオス共振器におけるレーザスペクトル特性の解明

レーザカオスデバイスの更なる小型化を目的の一つとして、カオス信号を生成可能な2次元微小共振器の形状に関する条件も探索した。特に、カオス共振器と呼ばれる光線カオスを示す共振器と光線カオスのない非カオス共振器の2種類を作製し、共振器の変形度、サイズ、注入電流値に対する依存性を系統的に調べた。その結果、カオス共振器に分類される共振器では、その形状の詳細に依存せず、レーザカオス信号を全く生成しない安定な単一モード発振が可能となることがわかった。一方、非カオス共振器と分類される共振器では、カオス出力の条件である多モード発振を示すことを明らかにした。この結果は、共振器の共鳴モード間の結合の大きさに依存するモード競合現象によって説明することができる。そこで、カオス共振器と非カオス共振器の共鳴モードの空間的重なりを数値的に調べ、それがカオス共振器と非カオス共振器で大きく異なることを統計的に明らかにした。

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 3 件)

S. Sunada, S. Shinohara, T. Fukushima, and T. Harayama, "Signature of wave chaos in emission spectra from microcavity lasers," arXiv:1602.05443, accepted in Phys. Rev. Lett. (査読有).

福嶋丈浩, 砂田哲, "二次元微小共振器レーザにおける空間モードの選択励起," レーザ研究, 43巻 6号, pp. 347-352 (2015.6), (解説論文, 査読有).

Shinohara, S. Sunada, T. Fukushima, T. Harayama, K. Arai, and K. Yoshimura, "Efficient optical path folding by using multiple total internal reflections in a microcavity," Applied Physics Letters, 105, 151111 (2014.10), (査読有), (DOI 10.1063/1.4898701).

〔学会発表〕(計 10 件)

鈴木 慎, 砂田 哲, 篠原 晋, 福嶋丈浩, 原山卓久, "短い外部共振器を用いたカオスレーザによる高速物理乱数生成," レーザ学会第 488 回研究会, RTM-16-06, 金沢, (2016, 2).

小山廣英, 原山卓久, 篠原 晋, 福島丈浩, 砂田 哲 “ 遅延戻り光生成のための2次元マイクロキャビティ内での長距離周期光線軌道の安定性,” レーザー学会第488回研究会, RTM-16-02, 金沢, (2016, 2).

S. Sunada "Synchronization phenomena in microlasers," The 4th International workshop on microcavities and their applications (WOMA2015), Hokkaido, Japan, (2015.12) (招待講演).

S. Sunada, K. Arai, and K. Yoshimura, "Experimental observation of common-noise-induced phase synchronization in semiconductor lasers," XXXV Dynamics Days Europe 2015, Exeter, UK, (2015.9).

T. Harayama, S. Sunada, S. Shinohara, and T. Fukushima, "Nonlinear dynamics and wave chaos in two-dimensional microcavity," XXX Dynamics Days Europe 2015, Exeter, UK, (2015.9).

S. Sunada, S. Shinohara, T. Fukushima, T. Harayama, and M. Adachi "Synchronization and single-frequency lasing in 2D microcavity lasers," International Workshop on Ray & Wave Mechanics in 2D Microcavity and Related Systems, Seoul, Korea, (2015,7) (招待講演).

堀岡海人, 砂田哲, 篠原晋, 福島 丈浩, 原山 卓久, 新井 賢一, "2次元微小共振器レーザーにおけるカオス発振と高速乱数生成," レーザー学会第473回研究会, RTM-15-02, (レーザー学会研究会報告, 473, pp. 7-11) 大阪, (2015, 2).

T. Fukushima, S. Shinohara, S. Sunada, T. Harayama, K. Arai, K. Yoshimura, K. Sakaguchi, and Y. Tokuda, "Compact Two-Dimensional Multipass GaAs Optical Cavity with a Long Path Length," Frontiers in Optics 2014, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2014), paper JW3A.31.

S. Sunada, K. Arai, and K. Yoshimura "Common noise-induced optical phase synchronization with lasers," 2014 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2014), Luzern, Switzerland, (2014.9).

砂田哲, 福島丈浩, 篠原晋, 原山卓久, 新井賢一, "光マイクロピリヤードを利用した光遅延と広帯域カオスの生成," 日本応用数理学会 2014 年度年会 研究部会オーガナイズドセッション(応用カオス), 東京, (2014.9).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等
<http://www.ms.t.kanazawa-u.ac.jp/~physics/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者
砂田 哲 (SATOSHI SUNADA)
金沢大学・機械工学系・准教授
研究者番号: 10463704

(2) 研究分担者
()

研究者番号:

(3) 連携研究者
()

研究者番号: