

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：13301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760039

研究課題名(和文) 2次元微小共振器半導体レーザーの動的特性の解明と制御

研究課題名(英文) Dynamical properties of two-dimensional microcavity semiconductor lasers

研究代表者

砂田 哲 (Sunada, Satoshi)

金沢大学・機械工学系・助教

研究者番号：10463704

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：2次元微小共振器半導体レーザーは、共振器形状に依存して多彩な発振現象を示す。本研究では、様々な形状の2次元共振器レーザーの動的特性を調べ、次の3つの結果を得た。(i)カオス共振器と呼ばれる形状の2次元共振器レーザーでは、発振モード間の同期現象により複数の発振モードの統合が起こり、単一波長の安定発振が可能となることを明らかにした。(ii)多重反射を利用して長光遅延を与える2次元共振器構造を提案し、それをあるレーザーの外部共振器として用いることで、約1 GHzの帯域のレーザーカオス現象を発生できることを示した。(iii) また、レーザー位相ダイナミクスにおいて共通ノイズ同期現象が生じることも明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We experimentally and numerically investigated various geometries of two-dimensional (2D) microcavity semiconductor lasers. The obtained results are summarized as follows: (i) In fully-chaotic microcavity lasers, stable single-wavelength lasing can be achieved owing to frequency-locking interaction among the lasing modes (ii) A 2D external cavity structure with a long-periodic orbit was designed and fabricated. Fast chaotic output can be generated by controlling the optical feedback caused by the external cavity. (iii) Moreover, we investigated the phase dynamics of lasers driven by optical broadband noise, and we revealed that the noise can induce synchronization in the laser phases.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：分科：応用物理学・工学基礎、細目：応用光学・量子光工学

キーワード：2次元微小共振器 半導体レーザー カオス 同期現象

1. 研究開始当初の背景

近年の半導体微細加工技術の進展により、様々なレーザーデバイスの作製が可能となっている。その中で、2次元微小共振器半導体レーザーは、2次元的な広がりを持つ共振器を利用して微小領域(数 μm から数十 μm の領域)に光を閉じ込めて発振させる、新しいタイプの微小レーザーデバイスである。楽器がその共振器形状に依存して、豊かで美しい音色を奏でるように、2次元的な広がりを持つ様々な形状の共振器の共鳴現象を利用して、従来の1次元的な共振器を持つレーザーデバイスにはない、多彩な発振モードを形成することが可能となる。現在、バイオセンシング・角速度センサ、光・量子情報処理等応用の観点や基礎物理的観点から世界的に活発に研究されている。

2次元微小共振器レーザーが注目される切欠は、1990年代後半にNatureとScience誌に発表されたYale大及びBell研のグループの論文である。彼らは、共振器内部の光線軌道がカオスとなる共振器(以下、カオス共振器)を考察することにより、波動カオス研究における重要なテーマのひとつである、波動状態と古典的運動との関係に関する問題が検証できる可能性を指摘した。同時に、共振器内部の光線運動のカオス性を考察することで、発振パターンが設計が可能であることも示した。以来、現在まで様々な形状の2次元微小共振器レーザーが提案され、波動カオス問題の実験的検証及びその応用可能性の観点から理論・実験的に研究されているが、その大部分は発振パターン等の静的特性に関する研究に留まっている。そもそもレーザー発振現象は、共振器形状によって決定される固有の共振器モードとレーザー媒質との非線形相互作用の結果として生じる現象である。さらにカオス共振器では、光線軌道のカオス性を反映して、複雑で多様なパターンを持つ共振器モードを形成する。よって、そのような多様な形態のカオス的共振器モードがレーザー媒質を通じて非線形相互作用する結果として生じる発振状態とその動的特性について解明することは、基礎物理的観点のみならず、光出力の安定性の制御やこれまでにない多機能な微小レーザーデバイス実現等の応用的観点から大変重要である。

2. 研究の目的

本研究では、カオス共振器を含む、様々な形状の2次元微小共振器のレーザー発振特性と共振器形状との関係を調べ、共振器形状による光強度ダイナミクスの制御可能性を探索する。具体的に取り組んだテーマは以下の3つであ

る。

(1) カオス共振器レーザーの動的特性の解明

2次元共振器は、共振器内部の光線軌道のカオス性の有無により、カオス的共振器と非カオス的共振器に分類できる。カオス共振器では複雑な空間パターンを有するモードが存在するため、非カオス的共振器と比較してモード間に強く相互作用が生じることで、光出力が安定化することが期待される。このことを、数値的・実験的に解明する。

(2) 2次元共振器構造を利用した高速カオス現象の生成

レーザー発振光を安定化させるだけでなく、高速に不規則に変動させることのできる2次元共振器構造を提案・実証する。レーザー光の高速不規則変動(レーザーカオス現象)を発生出来れば、物理乱数生成、秘匿通信、リモートセンシング等へ応用することができる。特に微小共振器構造を利用したデバイスは、これまでにない超小型の高速エントロピー源として利用できることを期待される。

(3) レーザ位相同期ダイナミクスの制御法の確立

更に、2次元共振器レーザーダイナミクスを利用した通信・情報処理への応用を想定し、2つの独立なレーザー間の位相同期現象を解明する。特に、近年、注目を集めているノイズによる位相同期制御がレーザーのような光デバイスでも適用できるのかを明らかにする。

3. 研究の方法

(1) カオス共振器レーザーの動的特性の解明

本研究では、カオス性が数学的に証明されているスタジアム型のカオス共振器に注目し、そのレーザー発振ダイナミクスを調べた。スタジアム型共振器を含む2次元共振器は、GaAs/AlGaAs屈折率分布分離閉じ込め単一量子井戸構造のウェーハに作製し、CW室温動作を得るために、AlN基板上にマウントした。カオス共振器からのレーザー発振光は広範囲に分布するため、効率的に光を集める光学系を構築し、電流・光出力特性、光スペクトル、遠視野像から、その発振特性を評価した。光強度の時間変動は高速光検出器を用いて測定した。

(2) 2次元共振器構造を利用した高速カオス現象の生成

外部共振器を有するレーザーでは、遅延戻り光に起因した不安定化により、数GHzの高速レーザーカオス現象を発生することが知られている。しかし、長い光遅延を与えるための共振器が不可欠であった。本研究では、2次元共振器を外部共振器として利用する。つまり、レーザーと結合した2次元微小共振器を作製し、レーザーカオス現象を発生させる。2次元共振

器の形状は、共振器内の多重反射により、共振器長の1.2倍以上の遅延距離を有するように設計した。レーザを含めた全体のサイズは、 $230\mu\text{m}\times 1\text{mm}$ であり、先行研究で示したカオス発生デバイスの10分の1以下である。

(3) レーザ位相同期ダイナミクスの制御法の確立

独立した2つの半導体レーザに共通の増幅自然放出ノイズを注入し、レーザ位相の同期特性について調べる。実験系は偏波保持光ファイバを用いて構成することで、偏波揺らぎに乱されることなく同期を調べることができる。レーザからの出力光は、参照光と干渉させ、その光検出器によりとらえ、ヒルベルト変換を用いて位相を抽出する。なお、注入ノイズの強さは、光減衰器により制御する。上記の実験系により、注入光強度と同期の良さとの関係、注入電流値等のパラメータ依存性を明らかにする。

4. 研究成果

得られた主な研究結果は次の3つである：

(1) スタジアム型共振器レーザでは、モード間の同期現象と利得競合によるモード選択相互作用により、単一波長で安定発振することを明らかにした。この安定発振は、実験・数値シミュレーションの結果から、次のように説明できる：スタジアム共振器では、共振周波数が近接するモードが複数あるため、同時発振時に自発的に周波数引き込みが起こり、ある励起パワー以上で同期現象が生じ、同じ発振周波数を有するモードに統合される。統合されたモードは、空間的に広がったパターンを有するため、利得を独占しやすく、他のモードの発振を抑制する。結果として、単一波長での発振が可能となる。このような同期現象による統合モードは、光と媒質間の相互作用を取り入れたMaxwell-Bloch方程式を用いて数値的に確認された。また、統合モードは、共振器の対称性に一致しない、非対称な空間パターンのモードとなる。そのため、実験的には遠視野像によりモードの統合化を調べた。得られた遠視野像は、境界要素法により得られたカオス共振器の共振モードを調べることで解析した。単一の共振モードでは、実験により得られた遠視野像とは、うまく一致しないが、同期現象が生じたと仮定して、複数のモードを重ね合わせたパターンとは、よい一致を示した。なお、非対称パターンを有する単一波長発振は、広い注入電流領域で観測され、その光強度も変化せず安定していた。

同期現象によるモードの統合化は、カオス共振器のようにモード間に強い相互作用を生じさせやすい共振器には、普遍的に生じる現象である。実際、数値的には、他のカオス共振器でもモードの統合化が確認できた。一方で、局在化した空間パターンのモードを有

する非カオス的共振器では、強い相互作用が生じにくいいため、モード選択効果が発生しにくい。よって、モード統合化による発振現象の安定化は、カオス共振器において一般的に観測される現象であると考えている。更に、本研究で明らかにされた発振の安定化は、狭ストライプ構造で採用されているDFBのような選択構造を適用しにくい、ブロードエリアレーザやVCSELのような空間的に広がったモードを有するレーザにも適用できると考えている。

(2) 長光遅延を生成する2次元外部共振器構造を有するレーザの発振特性と光強度ダイナミクスを調べた。レーザと2次元外部共振器間には、電気的なアイソレーションのため、エアギャップを設けているが、そのギャップ間隔が適切でないとうまく光が結合しない。そのため、ギャップ間隔が異なる複数の素子を作製し、 $1.5\mu\text{m}$ のギャップの素子が最も結合率が高くなることが判明した。その素子で2次元共振器からの遠視野像を測定したところ、光線モデルから得られた数値結果とよい一致を示すことがわかった。また、2次元共振器への電流値を増加させると、レーザの発振閾値が最大で13.8%低下することがわかった。その閾値低下は、戻り光の影響であると考えられる。以上の結果より、作製した2次元外部共振器は光をうまく遅延できること、および電流値で戻り光強度をコントロールできることと考えられる。更に、レーザの光強度のダイナミクスを高速光検出器を用いて測定したところ、電流値に依存して、定常発振、パルスパッケージと呼ばれるパルスの発振、そしてカオス的発振へと変化していくことがわかった。カオス発振時のパワースペクトルは、レーザノイズスペクトルと比較して、約20dB大きく、約1GHzの帯域を有した。そのような大きなカオス変動は、物理乱数のロバスト生成に有効であると考えられる。なお、本カオスレーザデバイスは、先行研究で開発されたデバイスと比較して、約10分の1のサイズである。しかし、本提案共振器は、光伝搬の可能性を検証するため、端面透過ロスが大きい形状を採用した。これを全反射による閉じ込め構造に変更させることで、より強い戻り光を生成、より広帯域カオスを発生できると考えられる。光遅延に最適な形状を設計し、検証することは今後の課題として残されている。全反射閉じ込めでの光遅延共振器は、カオス生成だけでなく、広帯域光信号に対する光遅延、レーザの狭線幅化、物質との非線形相互作用の増強等にも有効であると考えている。

(3) 3.で述べた実験系にて、共通の自然放出ノイズを注入することで、レーザ位相の同期制御が可能であることを解明した。本同期現象の特徴は、通常のレーザ光注入による同期現象と異なり、注入光への周波数同期は伴わ

ずに発生する. よって, 2つのレーザ光の周波数が僅かにずれていたとしても, 数十ナノ秒以上の長時間の位相同期が達成できる. この同期時間は, 本実験に用いたレーザの発振周波数が約 193 THzであることを考慮すると, レーザが約 800 万回以上振動する時間に相当する. 得られた実験結果は, リミットサイクル振動子による共通ノイズ同期現象による理論解析結果とよく一致することも確かめられた.

しかし, ノイズ強度を大きくすると, 理論による予測に反して, 非同期状態へ遷移することも明らかにされた. これは, 自然放出による光強度揺らぎが, 位相揺らぎに大きく影響していくためである. 本実験結果は, ガウシアンノイズと結合した半導体レーザのモデル方程式により, よく説明できることも明らかにした.

更に, レーザへの注入電流値により, 非同期状態へ遷移するノイズ強度が大きくなることも実験的に明らかにした. これは, レーザ振動状態への緩和率が電流値を増加させることで, 高くなり, 実効的に光強度の揺らぎが位相揺らぎに影響しにくくなるためである. この結果により, 緩和率を高くすることで, よりよい同期が達成できることがわかった. 本研究結果は, 自然放出等のインコヒーレント光によりレーザのコヒーレンスを制御する新しい位相制御法として発展できると考えている.

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 4 件)

1. T. Fukushima, S. Shinohara, S. Sunada, T. Harayama, K. Arai, K. Sakaguchi, and Y. Tokuda, "Selective excitation of lowest-order transverse ring modes in a quasi-stadium laser diode," *Opt. Lett.* Vol. 38, pp. 4158-4160 (2013). (査読有). DOI: 10.1364/OL.38.004158.

2. S. Shinohara, T. Fukushima, S. Sunada, T. Harayama, K. Arai, K. Yoshimura, "Anticorrelated Bidirectional Output of Quasistadium-Shaped Semiconductor Microlasers," *Opt. Rev.* Vol. 21, No. 2 pp. 113-116 (2014). (査読有). DOI: 10.1007/s10043-014-0018-9

3. S. Sunada, T. Fukushima, S. Shinohara, T. Harayama, and M. Adachi, "Stable single-wavelength emission from fully-chaotic microcavity lasers," *Phys. Rev. A* Vol. 88, 013802 (2013). (査読有). DOI: 10.1103/PhysRevA.88.013802

4. T. Fukushima, S. Sunada, T. Harayama, K. Sakaguchi, and Y. Tokuda,

"Lowest-order axial and ring mode lasing in confocal quasi-stadium laser diodes," *Appl. Opt.* Vol. 51, Issue 14, pp. 2515-2520 (2012). (査読有). DOI: 10.1364/AO.51.002515

[学会発表] (計 22 件)

1. R. Takahashi, Y. Akizawa, A. Uchida, T. Harayama, K. Tsuzuki, S. Sunada, K. Yoshimura, K. Arai, and P. Davis, "Physical random number generation using photonic integrated circuit with mutually-coupled semiconductor lasers," *Frontiers in Optics 2013 Technical Digest on CD-ROM FW4C.2*, (2013).

2. T. Fukushima, S. Shinohara, S. Sunada, T. Harayama, K. Sakaguchi, and Y. Tokuda, "Ray dynamical simulation of Penrose unilluminable room cavity," *Frontier in Optics, OSA Technical Digest on CD-ROM JW3A.19*, (2013).

3. K. Arai, S. Shinohara, S. Sunada, K. Yoshimura, T. Harayama, and A. Uchida, "Noise effects on generalized chaos synchronization in semiconductor lasers," *Proc. of Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2013)* (2013).

4. S. Shinohara, T. Fukushima, S. Sunada, T. Harayama, K. Arai and K. Yoshimura, "Nonlinear Modal Dynamics in Two-Dimensional Cavity Microlasers," *Proc. of Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2013)* (2013.09).

5. S. Sunada, T. Harayama, P. Davis, K. Arai, K. Yoshimura, K. Tsuzuki, M. Adachi, and A. Uchida, "Noise amplification based on dynamical instability and nondeterministic random bit generators," *Proc. of 2012 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2012)*, pp. 263-267 (2012).

6. Y. Akizawa, R. Takahashi, H. Aida, A. Uchida, T. Harayama, K. Tsuzuki, S. Sunada, K. Yoshimura, K. Arai, and P. Davis, "Nonlinear Dynamics in a Photonic Integrated Circuit for Fast Chaos Generation," *Proc. of 2012 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2012)*, pp. 134-137 (2012).

7. R. Takahashi, Y. Akizawa, H. Aida, A. Uchida, T. Harayama, K. Tsuzuki, S. Sunada, K. Yoshimura, K. Arai, and P. Davis, “Random Number Generation in a Photonic Integrated Circuit for Fast Chaos Generation,” Proc. of 2012 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2012) , pp. 138-141 (2012).

8. K. Arai, T. Harayama, P. Davis, and S. Sunada, “Multi-Bit Sampling from Chaotic Time Series in Random Number Generation,” Proc. of 2012 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2012) , pp. 268-271 (2012).

その他 14 件 (国内学会・報告会)

[図書] (計 0 件)
なし

[産業財産権]
○出願状況 (計 1 件)

名称：光共振器、結合光共振器
発明者：篠原晋、砂田哲、原山卓久、福嶋丈浩、新井賢一、吉村和之
権利者：日本電信電話株式会社、国立大学法人金沢大学
種類：特許
番号：特願 2014-037646
出願年月日：平成 26 年 2 月 28 日
国内外の別：国内

○取得状況 (計 0 件)
なし

[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・助教
研究者番号：10463704

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし