

平成 29 年 6 月 2 日現在

機関番号：33108

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26790059

研究課題名(和文) 複雑信号印加によるカオス発振半導体レーザーの軌道不安定性制御と秘匿通信への応用

研究課題名(英文) Orbital instability of chaotic laser diode applying complex signal and its application to secure communication

研究代表者

海老澤 賢史 (Ebisawa, Satoshi)

新潟工科大学・工学部・助教

研究者番号：50386596

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：光注入によりカオス発振する半導体レーザー(LD)を考え、LDの駆動電流に複雑な信号を印加することでカオス発振LDの軌道不安定性を制御する手法を提案した。まず、印加信号として疑似ランダム信号を用いたときLD系の軌道不安定性が向上することを示した。次に印加信号の周波数帯域に対する軌道不安定性の周波数応答について調査し、この周波数応答がLD系のカオススペクトルと一致することを発見した。さらに、カオス信号を印加した場合と、同様なスペクトルを持つような疑似ランダム信号を印加した場合の軌道不安定性を向上させる効果を比較した。これにより、印加信号のスペクトル形状が軌道拡大率の向上の要因であることを示した。

研究成果の概要(英文)：The chaotic dynamics of a laser diode (LD) system with optical injection is studied, where an additional signal is applied to the drive current of the master LD. We found that the orbital instability of the LD system is enhanced by applying a pseudorandom signal, and the result showed good agreement that of linear stability analysis. Then we investigated the response of the orbital instability to the frequency range of the applied signal and confirmed a similar trend between this response and the spectrum of the LD system. Moreover, we compared the effect of using a chaotic signal and a band-limited pseudorandom signal having a similar spectrum to the chaotic signal as the applied signal. We showed that the spectrum of the applied signal is a factor affecting the orbital instability of an LD system, and that the use of a pseudorandom signal as the applied signal more greatly enhances the orbital instability than the use of a chaotic signal.

研究分野：応用光学，光通信工学

キーワード：半導体レーザーのカオス発振 レーザーカオス

1. 研究開始当初の背景

半導体レーザー(LD)に外部共振器を設けて戻り光を戻すことで容易に LD がカオス発振することが知られており[1]、この高速で広帯域な振動は様々な工学分野での応用が期待されている。ここでは、カオス発振 LD を物理暗号へ適用する光カオス秘匿通信に注目する。従来の秘匿通信(暗号通信)はソフトウェア的な手法で作成された暗号コードを用いているため、計算量複雑性に依存しており将来の計算機技術の発展により秘匿性を失う可能性がある。これに対し物理現象に起因する秘匿通信として様々な光カオス秘匿通信手法が提案されている[1]。いずれも送信器 LD と受信器 LD のカオス信号が同期する現象(カオス同期現象)を用いたハードウェア依存の秘匿通信であり、秘匿性を保つ「鍵」にあたる物は両 LD 系のパラメーターの値である。しかし、送受信器間の強い光注入によりパラメーターが全く同じ理想的な LD でなくともカオス同期可能になる許容範囲があり、多少の誤差であれば両 LD は同期してしまう。送信器の出力と受信器の出力を観測することで両者が同期しているかどうかは容易に判別できることから、送信器の出力と同期した LD を用いて受信器を偽造することは可能であり、盗聴者にもメッセージを復号できるようになってしまう。これを回避するために、共通カオス信号を用いることで2つの LD を同期させる研究もなされている[2]。しかしながら、光カオス秘匿通信へこれを適用することを考えると、様々な外部からの影響や LD パラメーター誤差によりビットエラーが生じる恐れがある。カオスはその特性として初期値鋭敏性を持ち、非常に僅かな初期値やパラメーターの誤差が全く異なる時系列を生じさせる。このために時系列を制御することが非常に難しい。一方、研究代表者らは初期値鋭敏性により生じる初期値の微小な誤差が時間とともに指数関数的に拡大していく特性(軌道不安定性)の強さはカオス系に応じて概ね等しい[3]ことに着目し、系のパラメーターを変化させることで軌道不安定性を制御し、光カオス秘匿通信に用いる LD 送受信器アレイを用いた秘匿通信手法を提案した(Chaotic LD Transmitter Receiver Array 法)[3]。LD 送受信器を複数用いてアレイを2種類構成し、アレイのダイナミクスの差異より軌道不安定性の差異を作り出し、それをディジットとして用いるデジタル通信手法である。研究代表者らは平成 18-19 年度若手研究(B)の助成の下、この手法が送信器と同期している LD を受信器として用いる場合には通信不能で、それ以外の特定の LD を受信器として用いる場合の

み通信可能にできる、カオス同期に依存しない秘匿通信であることを示した。すなわち、通信の「鍵」となる適切な受信器 LD の情報が送受信器間の同期現象により推測することが困難であるため、盗聴者に受信器を偽造されずハードウェア依存の秘匿通信が達成できるという特徴を持つ[4]。加えて、研究代表者らは本手法のビットエラーを低減させるために、光学系によって定まるカオスのダイナミクスを外部からの疑似ランダムな信号により変化させ、カオス系の軌道不安定性が増加する数値的に示し[5,6]、これを秘匿通信手法に応用することを提案している。

このような、カオス発振 LD 系のダイナミクスを外部の疑似ランダム信号で制御する研究は、秘匿通信をはじめとする工学分野等において応用が期待できるが、知る限りでは他に研究されていない。しかし、外部信号を印加したカオス発振 LD 系についての詳細かつ体系的な調査や、カオス発振 LD 系の軌道不安定性の制御手法の確立は、カオス応用のさらなる発展に対し非常に重要である。

2. 研究の目的

カオス発振 LD 系(戻り光のあるカオス発振 LD とそれを光注入した LD による系)の駆動電流に、疑似ランダム信号や独立な外部カオス系により作成したカオス信号など複雑信号を印加することで、カオス発振 LD の軌道不安定性を増大可能であることの理論的解析と検証を行う。また、駆動電流にカオス信号を加えた場合と、カオスとしての特性を持たない疑似ランダムな信号を加えた場合とで効果を比較し、単に広いスペクトルが必要なのか、カオスとしての性質が有効であるか検証する。また、どのスペクトル帯域が有効かを調査する。これによりカオス発振 LD の軌道不安定性の増大手法を確立する。さらにカオス同期により秘匿性が失われない光カオス秘匿通信手法をめざし、自身の軌道不安定性を変化させずに、他方の LD の軌道不安定性を変化させることが相互光注入系で可能であることを示す。

3. 研究の方法

(1) 複雑信号印加についての理論解析

光注入型のカオス発振 LD 系等について、その特性を示すレート方程式[1]を用いて線形安定性解析を行う。これによりカオス発振 LD が複雑信号を印加することによりカオス性を増大することが可能であることを示す。また、線形安定性解析の結果と注入係数に対する分岐図、及びカオス発振の軌道不安定性を定量化する軌道拡大率を比較し、理論との一致を確認する。

- (2) 疑似ランダム信号印加の効果
 戻り光によりカオス発振する LD (LD1) が、一方向にもうひとつの LD (LD2) に光注入するカオス発振 LD 系を考える。LD1 と LD2 の駆動電流に疑似ランダム信号を印加し、印加信号の標準偏差と注入係数に対する軌道拡大率を求める。これにより、印加信号が軌道不安定性に与える効果を検証する。
- (3) 印加信号の周波数帯域の検討
 LD の駆動電流に印加する疑似ランダム信号に帯域制限をかける。これにより効果的に LD の軌道不安定性を増大できる信号の周波数特性を導く。
- (4) 光カオス秘匿通信と相互光注入系
 カオス発振 LD 系の軌道不安定性を光カオス秘匿通信へ応用することを考えると、受信側 LD の軌道不安定性を変化させる際に送信側の軌道不安定性にも変動があることは望ましくない。そこで、自身の軌道不安定性を変化させずに他方の軌道不安定性を変化させることを相互光注入系を導入することで達成する。

4. 研究成果

- (1) 複雑信号印加についての理論解析
 複雑信号を印加しない LD 系のレート方程式に対する線形安定性解析を行った。注入係数が増加するに従い LD の発振モードは徐々に増加し、それに伴い発振も複雑になっていき、十分に注入係数が大である範囲では複雑さは次第に収束していくことが予想された。しかし、分岐図は図 1(a) のようになり予想と一致しないように見える。一方、LD の駆動電流に複雑信号を印加すると、分岐図は図 1(b) のようになり、対応する軌道拡大率も徐々に増加し収束に向かう。すなわち、LD の駆動電流に複雑信号を印加することで潜在的なカオスの特性が顕在化することがわかる。

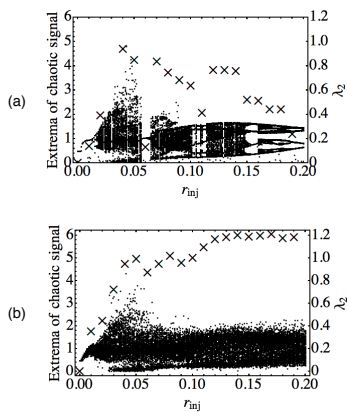


図 1: 光注入型 LD の分岐図と軌道拡大率

- (2) 疑似ランダム信号印加の効果
 カオス発振 LD 系の 2 つの LD にそれぞれ異なる疑似ランダム信号を印加する。

図 2(a) は LD2 への印加疑似ランダム信号の標準偏差が 0.1 のときの、注入係数と LD1 の印加信号の標準偏差に対する軌道拡大率を示している。注入係数が 10-20 の範囲では LD1 からの光注入により LD2 の周波数帯域は拡大している。このため軌道拡大率は LD1 の標準偏差によらず大きな値を持つ。一方、注入係数が 30 以上の値の範囲では LD1 と LD2 がカオス同期を起こす。このため LD2 の軌道拡大率も LD1 に印加された疑似ランダム信号に大きく依存し、LD1 の印加信号の標準偏差に依存して増大していくことがわかる。また、図 2(a) は注入係数が 40 の場合に LD1 と LD2 それぞれの印加信号の標準偏差に関する LD2 の軌道拡大率を示している。各パラメータに対する増加率をみると、LD2 の印加信号の標準偏差に対するものに比べ、LD1 のものの方が大きい。いずれの LD の駆動電流に疑似ランダム信号を印加しても、LD の軌道不安定性の増大効果は期待できるが、特に LD1 の駆動電流に加えることが効果的であることを示している。

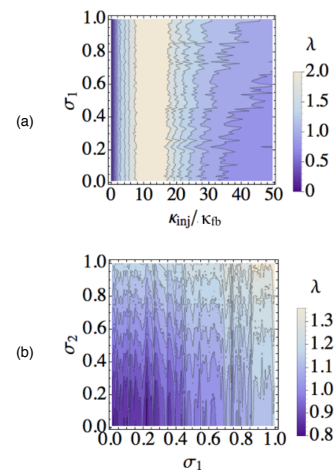


図 2: 光注入型 LD 系の軌道拡大率

- (3) 印加信号の周波数帯域の検討
 戻り光を有しない LD (LD1) からもうひとつの LD (LD2) へ一方向に光注入する光注入型 LD 系を考える。LD2 の駆動電流には印加信号を与えず、LD1 のみに疑似ランダム信号を与える。この信号は周波数 f [GHz] $\sim f + 0.5$ [GHz] の範囲で帯域制限されており、いずれの場合も平均値は等しくなるよう規格化している。図 3 に各カットオフ周波数ごとの光注入率に対する軌道拡大率を一部のみ示している。この結果、3.5 GHz 付近で最も軌道拡大率が增大することが分かった。さらに軌道拡大率の周波数特性はカオス発振 LD2 のフーリエスペクトルとよく一致することを示した。しかしながら、外部カオス信号を印加した場合には軌道拡大率増大の効果は少なく、これより軌

道拡大率増大の効果の要因は、印加信号の周波数スペクトル形状とランダム信号としての特性であるものと考えられる。

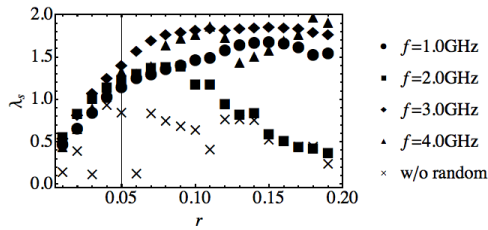


図 3: 帯域制限した信号と軌道拡大率

(4) 光カオス秘匿通信と相互光注入系

戻り光を持つ LD が互いに光注入し合う 2 つの LD (LD1, LD2) からなるカオス系を考える。先に述べた方に LD1 の駆動電流に疑似ランダム信号を印加することで LD2 の軌道不安定性を増大させることができ、これにより LD1 から LD2 へメッセージを送ることが可能である。この際、盗聴の危険性を考えれば LD1 の軌道不安定性は一定のままであることが望ましい。図 4 に、あるパラメーターでの相互光注入系における LD1 の戻り光係数に対する LD1 と LD2 の軌道拡大率を示している。戻り光係数が小さい範囲では LD1 の軌道拡大率が一定の値であるにもかかわらず、LD2 の軌道拡大率が減少する。これより適切なパラメーターを選択することで送信側である LD1 自身の軌道拡大率をあまり変化させず、他方の LD2 の軌道拡大率を大きく変化させることが可能であることを示した。さらに、これを元に多値情報を扱った光カオス秘匿通信手法を提案している。

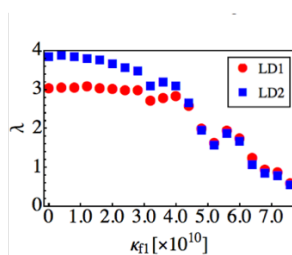


図 4: 相互光注入型 LD 系の軌道拡大率

<引用文献>

① J. Ohtsubo, J. Quantum Electron., vol. 38, pp. 1141-1154, 2002.
 ② 大和田他, 電気学会論文誌 C, vol. 128, pp. 768-774, 2008.
 ③ S. Ebisawa and S. Komatsu, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 43, pp. 5910-5917, 2004.
 ④ S. Ebisawa and S. Komatsu, Applied Optics, Vol. 46, pp. 4386-4396 (2007).

⑤ 海老澤賢史, レーザー研究, Vol. 39, No. 7, pp. 525-528 (2011).
 ⑥ 海老澤他, 日本応用数理学会 2012 年度年会講演予稿集, 367. pdf (2012)

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)

① S. Ebisawa, J. Maeda and S. Komatsu, Chaotic oscillation of laser diode with optical injection and pseudorandom signal, XXXVII Dynamics Days Europe, 2017 (国際会議論文, 採択決定)
 ② 海老澤賢史, 石川 篤, 小松 進一, 疑似ランダム信号を加えた相互光注入カオス発振半導体レーザーの軌道不安定性, レーザー学会第 488 回研究会報告, No. RTM16-01~09, 2016, 17-21
 ③ 石成 迪人, 海老澤賢史, 前田 譲治, 小松 進一, 双方向光注入半導体レーザー系を用いた多値光カオス秘匿通信, レーザー学会第 478 回研究会報告, No. RTM15-01~05, 2015, 13-18

[学会発表] (計 10 件)

① 坂口 慧, 海老澤賢史, 前田 譲治, 光注入型カオス発振面発光レーザーのフラクタル性, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 2017 年 3 月 14-17 日, 横浜
 ② 石原 太樹, 海老澤賢史, レーザーカオス注入による半導体レーザーの軌道不安定性, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 2017 年 3 月 14-17 日, 横浜
 ③ 外山 晴久, 海老澤賢史, 疑似ランダム信号を印加したマスター・スレーブ型半導体レーザーのカオス発振, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 2017 年 3 月 14-17 日, 横浜
 ④ 海老澤賢史, 石成 迪人, 前田 譲治, 小松 進一, 疑似ランダム信号印加半導体レーザーカオスの軌道不安定性の向上と抑制, 「レーザーのカオス・ノイズダイナミクスとその応用」研究会, 2016 年 11 月 21-22 日, 石垣
 ⑤ 海老澤賢史, 石成 迪人, 前田 譲治, 小松 進一, 疑似ランダム信号印加半導体レーザーカオスの軌道不安定性の向上と抑制, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会講演予稿集, 2016 年 9 月 13-16 日, 新潟
 ⑥ 海老澤賢史, 石川 篤, 小松 進一, 相互光注入と戻り光を用いたカオス発振半導体レーザーの軌道不安定性, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会講演予稿集, 2015 年 9 月 15, 名古屋
 ⑦ 海老澤賢史, 石成 迪人, 中尾 俊也, 前田 譲治, 小松 進一, 双方向光注入と疑似ランダム信号印加によるカオス発振

半導体レーザーの軌道不安定性, 日本応用数理学会 2015 年度年会, 2015 年 9 月 9 日, 金沢

- ⑧ 海老澤賢史, 前田譲治, 小松進一, 疑似ランダム信号を印加した戻り光半導体レーザー系のカオス発振, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 2014 年 9 月 17-20 日, 札幌
- ⑨ 中尾俊也, 海老澤賢史, 前田譲治, 戻り光のあるカオス発振半導体レーザーの静的特性の制御, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 2014 年 9 月 17-20 日, 札幌
- ⑩ 海老澤賢史, 前田譲治, 小松進一, 複雑信号印加によるカオス発振戻り光半導体レーザーの動的特性制御, 日本応用数理学会 2014 年度 年会, 2014 年 9 月 3-5 日, 東京

6. 研究組織

(1) 研究代表者

海老澤 賢史 (EBISAWA, Satoshi)

新潟工科大学・工学部・助教

研究者番号 : 50386596

(2) 研究協力者

石成 迪人 (ISHINARI, Michito)

中尾 俊也 (NAKAO, Toshiya)

石川 篤 (ISHIKAWA, Atsushi)

坂口 慧 (SAKAGUCHI, Satoshi)

石原 太樹 (ISHIHARA, Taiki)

外山 晴久 (TOYAMA, Haruhisa)