

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 4 月 1 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560039

研究課題名（和文） 半導体レーザーにおける直交偏光モードカオスの励起とその応用

研究課題名（英文） Chaos in Semiconductor Lasers with Polarization-Rotated Optical Feedback and its Applications

研究代表者

大坪 順次 (OHTSUBO JUNJI)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号：00176942

研究成果の概要（和文）：本研究においては、端面発光半導体レーザーと面発光半導体レーザーに着目し、直交する偏光成分へ戻り光を施し直交偏光モードを励起することにより、新しいカオス発生の原理・ダイナミクスを明らかにする。さらに、励起されたカオス振動を光乱数発生やカオス秘匿通信におけるランダムマスクキャリアとして応用する方法について理論および実験的研究を行う。研究の結果、偏光回転により多様なカオス同期の形態が明らかになり、この原理に基づくセキュリティ鍵を新たに追加することができ、より高度で安全性の高いカオス通信が可能であることが示された。

研究成果の概要（英文）：In this research, we focus on the dynamics of semiconductor lasers with polarization-rotated optical feedback and optical injection. We can expect a rich variety of dynamics in these systems. Further, the system can be applied to highly secure data transmissions compared with simple systems of parallel-polarization feedback and optical injection. We performed both theoretical and experimental studies for the dynamics and the methods of secure chaotic communications, and proved that they were good candidates for hardware-dependent optical secure communication systems.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用光学・量子光学

キーワード：半導体レーザー、カオス、偏光、カオス通信

1. 研究開始当初の背景

通常、端面発光半導体レーザにおいては、活性層幅に沿った方向への偏光モード(TE 偏光)のみが発振する。半導体レーザでは戻り光によってカオス振動が発生するが、これまでレーザ発振と同じ TE 偏光を戻り光として使うことが多かった。一方、以前から TE 偏光をそれと直交する TM 偏光方向に回転して戻し、光強度とキャリアの結合に基づくインコヒーレント光注入とする理論的研究が主に行われており、この方法によるピコ秒パルス列の発生などが期待されていた。

しかし、端面発光半導体レーザにおける TE 偏光を TM 偏光へ戻す場合、コヒーレントな直交する場の結合として取り扱う必要があることが、ごく最近になり我々のグループをはじめとして指摘され、やっと共通の理解となった。しかし、直交偏光戻り光によって発生するカオス現象についてはまだほとんど研究が進んでいない。

一方で、最近面発光半導体レーザ(VCSEL)と呼ばれる半導体基板に垂直方向に光を出す新しいタイプのレーザが作られるようになった。このレーザでは、上述の従来型のレーザとは異なり、直交する二つの偏光軸を持つ光が同時不安定発振することがあるレーザである。このようなレーザに、偏光選択をして光を戻したりあるいは外部レーザからの光を注入することにより、レーザの安定、不安定発振を制御できる可能性がある。

このため、直交偏光戻り光における半導体レーザカオスダイナミクスとそのメカニズムの解明は急務である。さらに、この研究により、レーザの偏光発振安定化や、より効率的な物理高速乱数発生、カオス通信における送受信機としての応用も期待できる。

2. 研究の目的

本研究においては、端面発光半導体レーザと面発光半導体レーザ(VCSEL)に着目し、直交する偏光成分へ戻り光を施し直交偏光モードを励起することにより、新しいカオス発生の原理・ダイナミクスを明らかにする。端面発光半導体レーザは、本来一方向への偏光軸(TE モード)のみ安定に発振するレーザであるが、我々の研究により TE モードの偏光軸を 90 度回転させてレーザに戻すと、TE モードに直交する TM モードが励起されるところまでは分かってる。しかし、その詳しいダイナミクスについてはほとんど理解されていない。本研究の一つの目的は、端面発光半導体レーザにおいて発生する直交モード励起カオスを詳細に調べることである。

一方、VCSEL での直交モードの発振、それらのカオス的振る舞いについては、いくらかの研究がされているものの、十分な理解が得

られているとは言い難い。VCSEL では二つの偏光モードが戻り光や光注入により容易にしかも同時に励起されるため、端面発光半導体レーザよりも実験などはやりやすい面もあるが、その分偏光相互結合も強く、端面発光半導体レーザと著しく異なるダイナミクスが期待される。本研究のもう一つの目的は、これらのダイナミクスを明らかにすることである。

さらに、これらの成果を元に、カオス不安定発振する直交戻り光半導体レーザの安定化の指針を得る。また、直交偏光戻り光などによって励起されたカオス振動を光乱数発生やカオス秘匿通信におけるランダムマスクキャリアとして応用する方法について理論および実験的研究を行う。

3. 研究の方法

端面発光半導体レーザは通常単一 TE モード発振となるが、偏光を回転させて光を TM モードとして自分自身に戻すことにより、両モードをカオス発振させることができる。ただし、TM モードの励起のためにはかなりの強い励起が必要であるため、まず理論、実験によりそのような励起がどのような範囲で起こるのかから始めなければならない。前にも述べたように、端面発光半導体レーザでの直交モード励起はあまりデータがないため、実際の実験では効率のよい励起のための現実的な実験配置についても配慮する必要がある。

もう一つの課題である面発光半導体レーザ(VCSEL)においては、戻り光により二つの直交モードが容易に発振する。一方で、VCSEL と端面発光レーザは異なる構造のレーザではあるが、直交偏光モードの結合においては両者のアナロジーが指摘されている。その分、VCSEL での偏光モード結合の組合せは端面発光半導体レーザに比べて考慮する要素が多くなり、相互結合の仕方、結果の分類についての整理が必要になる。

これらを総合して、直交偏光モード戻り光半導体レーザにおけるカオス現象、ダイナミクスについて明らかにすることにより、各レーザにおけるカオス不安定性を抑えるための方策について検討する。さらに、カオスの積極的利用として、カオス乱数発生器、カオス秘匿通信発振器として応用の可能性について検討する。

4. 研究成果

(1) 端面発光半導体レーザの直交偏光戻り光ダイナミクスについて

端面発光する半導体レーザにおいて、戻り光を偏光回転しレーザに再注入するモデル

を定式化した。偏光回転戻り光においては、従来よりインコヒーレントモデルが用いられてきたが、戻り光が強くなるとこの近似モデルは成り立たなくなり、コヒーレントモデルの導入が必要になる。本研究においてはこのモデルを導入し、レーザの位相、TE-TMモード間の周波数離調も考慮した式の導出を行った。この結果、従来 TE と TM モード波形が同位相でカオス同期する関係だけではなく、逆位相となって同期する新しい現象も見つけた。また、これらの理論の裏付けとして実験も行い、概ね理論と一致する結果が得られた。しかし、実験では検証する周波数帯域の制約のため、高周波カオス成分を十分に取り込めなかった。このため、高周波成分を含む理論解析と一部整合がとれない現象がみられた。今後の実験課題として、10GHz 以上の高周波成分を含むカオス信号の解析が残った。

(2)面発光半導体レーザの直交偏光戻り光ダイナミクスについて

面発光半導体レーザ(VCSEL)モデルでは、直交する二つの偏光モードが元々大きな値で拮抗して発振するため、コヒーレント効果を考慮したモデルが必須である。面発光半導体レーザにおいてもコヒーレントモデルを使用した。VCSEL では端面発光半導体レーザのレート方程式を拡張したモデル、電子スピンを考慮したスピントリップモデルと呼ばれる二つのモデルを解析に用いた。VCSEL における戻り光効果について、偏光方向を同一とする戻り光の場合と直交偏光戻り光とする場合の理論と実験を行い、直交戻り光の場合により多様なカオスダイナミクスが観測されることを示した。VCSEL においては、端面発光半導体レーザに比べ、直交偏光モードが同時に励起されるため、より複雑なダイナミクスが見られる。このことは、偏光を付加的なカオス同期の鍵として、よりセキュリティ度の高いカオス同期通信が行えることを示したと言える。

(3)直交偏光注入カオス同期

以上の結果を踏まえ、直交偏光戻り光半導体レーザにおけるカオス同期について実験を行い、理論解析の結果と比較検討した。さらに、平行偏光戻り光の場合のカオス同期結果との比較も行った。平行偏光戻り光の場合と比べ、カオス鍵の要素が増えるため、実権によるカオス同期のパラメータ誤差の範囲の許容度は下がるが、これはカオス鍵が厳密になったことを意味している。また、偏光戻り光としてもカオス同期の質の点では、精密な実験を行った結果では同期精度の違いは大差がなかった。これらのことから、偏光戻り光半導体レーザは、カオス通信の要素とし

て十分な機能を果たすことが出来、さらに暗号鍵がより精密になるため、このようなシステムは高度なカオス暗号化通信に適していることがわかった。

(4)双方向光注入カオスダイナミクスと応用

(3)のカオス同期については、送信機から受信機への一方向のカオス信号、メッセージの伝送を仮定したシステムの検討を行った。一方、カオス同期、通信においては、二つのカオス系で双方向にカオスとメッセージを送る方式も考えられる。この場合、通常のカオス秘匿通信とは異なり、量子暗号通信のようにビットが立ったときの暗号鍵をあらかじめ決めておき、通信を相互に行う方式が考えられる。この場合も、二つのカオス系の同期が重要になる。双方向カオス同期系を端面発光半導体レーザおよび VCSEL で構成し、双方向カオス同期の課題について検討を行った。この通信方式においては、二つのカオス系が零遅延で同期するシステムがベストである。この研究では、カオス同期のシステムにのみ注目し、メッセージ伝送については今後の課題とした。このような系で、平行偏光注入、および偏光を考慮したシステムについて零遅延同期が達成できるシステムをどう構築できるか、あるいは遅延があったとしてもそれを自動的に補正出来るシステムをどう構築するかについて検討した。たとえば、通信の途中にカオス化した半導体レーザを挿入し、通信する相互レーザにブロードキャストするような系を組むことにより、カオス同期の精度を高め、遅延をうまく補正できるシステムが構築できることを示した。

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 15 件)

① Dynamics and Pulse-Package Oscillations in Broad-Area Semiconductor Lasers with Short Optical Feedback (Akira Takeda, Rui Shogenji, and Junji Ohtsubo) Appl. Phys. Lett. 査読有 Vol.101, 231105-1-3 (2012).

② Chaos Dynamics in Vertical-Cavity Surface-Emitting Semiconductor Lasers with Polarization-Selected Optical Feedback (Hiroshi Aoyama, Shinnya Tomida, Rui Shogenji, and Junji Ohtsubo) Opt. Commun. 査読有 Vol.284, pp.1405-1411 (2011).

③ Chaos Dynamics in Semiconductor Lasers with Polarization-Rotated Optical Feedback (Yasutoshi Takeuchi, Rui Shogenji, and Junji Ohtsubo) Opt. Rev. 査読有 Vol. 17, pp. 144-151 (2010).

〔学会発表〕（計 37 件）

- ① Semiconductor Laser Chaos and Dynamics of Broad-Area Semiconductor Lasers (Invited) (Junji Ohtsubo) International Conference on Delayed Complex Systems DCS12 (Mallorca, Spain, 2012.6).
- ② Chaos in Semiconductor Lasers and Recent Topics in New Device Structures (Invited) (Junji Ohtsubo) International Photonics Conference (IPC) (Tainan, Taiwan, 2011.12).
- ③ Chaos and Applications in Semiconductor Lasers, (Invited) (Junji Ohtsubo) Optical Microcavities: Quantum Chaos in Open Systems Meets Optical Resonators, 3rd Asian-German Workshop (Max Planck Institute, Dresden, Germany, 2010.5).

〔図書〕（計 1 件）

- ① Semiconductor Lasers: Stability, Instability and Chaos; Third Edition (Junji Ohtsubo) Springer-Verlag, Berlin (2012) pp.1-570.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.sys.eng.shizuoka.ac.jp/~ohtsubo1/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大坪 順次 (OTSUBO JUNJI)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号：00176942

(2) 研究分担者

生源寺 類 (SHOGENJI RUI)

静岡大学・工学部・講師

研究者番号：90432195

(3) 連携研究者

なし ()

研究者番号：