

氏名	小原 翔馬
博士の専攻分野の名称	博士 (工学)
学位記号番号	博理工甲第 1124 号
学位授与年月日	平成 31 年 3 月 20 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	相互結合された半導体レーザにおけるカオス同期現象の非線形ダイナミクス依存性
論文審査委員	委員長 教授 内田 淳史 委員 教授 島村 徹也 委員 准教授 大久保 潤 委員 准教授 小室 孝

## 論文の内容の要旨

結合系における非線形振動子は多様な振る舞いを示し、特に近年、半導体レーザにおけるカオス現象が急速に発展している。半導体レーザにおけるカオス現象は、自身の光を戻り光としてフィードバックすることにより、GHz オーダの高速なカオス振動が発生することが大きな特徴である。さらに、半導体レーザを光結合することによるカオス同期現象も近年非常に注目されている。半導体レーザにおける同期現象は、現象理解の観点の学術的基礎研究のみならず、情報セキュリティ分野や機械学習や意思決定等の情報処理への工学的応用に関する研究が提案されている。半導体レーザカオスの高速かつ不規則なカオス振動を利用して、Tb/s オーダの生成速度を有する高速物理乱数生成への応用が行われている。また、レーザや光検出器を同一基板上に集積化することにより、外部共振器長を mm オーダまで短くした光集積回路が提案されており、高速物理乱数生成や非線形ダイナミクスの現象理解に関する研究も行われている。

戻り光を有する半導体レーザの非線形ダイナミクスの一種に、LFF (Low-frequency fluctuations) と呼ばれる低周波不規則振動現象が知られている。LFF のダイナミクスについて実験的および理論的に多くの研究が行われており、広く注目されている。さらに近年では、結合された半導体レーザの LFF におけるカオス同期に関する調査が行われている。一方で、半導体レーザにおける同期調査は、結合距離が長い場合の調査が多く、短い外部共振器長を有する光集積回路における同期に関する報告例は少ない。特に、相互に結合された半導体レーザを有する光集積回路におけるカオス同期の観測は未だ達成されておらず、周期振動の同期のみに留まっている。この理由として、外部共振器長が短い場合ではレーザの緩和発振周波数と外部共振周波数の非線形相互作用が得られにくく、カオス振動が発生しづらい点が挙げられる。また、非対称システムにおけるカオス同期現象に関する研究も行われている。しかしながら、非対称な結合システムにおける半導体レーザのダイナミクスおよび同期現象に関する調査は未だに十分ではない。さらに、結合された半導体レーザの非線形ダイナミクスと同期状態との関係性については未だ報告されていない。

そこで本研究では、相互に結合された半導体レーザの非線形ダイナミクスおよびカオス同期現象を実験および数値計算により調査することを目的とする。はじめに、短い外部共振器長における 1 つの半導体レーザの非線形ダイナミクスの分岐現象に関する調査を行う。次に、2 つの半導体レーザが相互結合された光集積

回路の同期調査を行う。特に、2つのレーザのダイナミクスの変化が同期状態に与える影響を調査する。さらに、実験結果の再現および物理的メカニズムの解明のための数値モデルを提案し、レーザの出力強度や相互相関値、光周波数差の時間変化に着目して、非線形ダイナミクスと同期状態の依存性について調査する。加えて、非対称なパラメータ設定における同期状態への影響についても議論する。

第1章では、本研究の背景、目的、および本論文の構成を述べている。

第2章では、本論文の序論として、短い外部共振器長を有する光集積回路の非線形ダイナミクスおよび高速物理乱数生成等の応用例や、結合された半導体レーザにおける様々な同期現象について述べている。

第3章では、短い外部共振器長を有する光集積回路における非線形ダイナミクスを実験的に調査している。各ダイナミクスの特徴について述べ、7種類のダイナミクスに分類を行っている。また、パラメータ変化に対する2次元分岐図の作成を行い、各ダイナミクスの発生領域を明らかにしている。さらに、2つの半導体レーザが相互結合された光集積回路に対しても同様に非線形ダイナミクスの実験的調査を行っている。

第4章では、相互結合型光集積回路を用いてカオス同期の調査を実験的に行っている。まず、2つのレーザの注入電流変化に対するカオス同期の観測および達成条件の調査を行っている。その結果、一方のレーザの注入電流が発振しきい値電流付近の場合や、2つのレーザ間で非対称に電流を注入した場合に、高い相関値が観測できることが分かった。次に、LFFにおけるカオス同期の調査として、レーザの時間波形にローパスフィルタを適用することにより、元の信号と低周波成分であるフィルタ適用後の信号の各々に対して同期調査を行っている。その結果、着目する周波数成分により異なる同期状態を観測した。また、この現象は2つのレーザのダイナミクスの変化が関係しており、特に高速なカオス振動と低周波成分であるLFFの発生に依存して同期状態が変化することが実験的に明らかとなった。この現象を、ダイナミクス依存型同期(Dynamics-dependent synchronization)と呼び、新たな同期現象として提唱している。

第5章では、半導体レーザのレート方程式を用いて、戻り光を有する半導体レーザの非線形ダイナミクスを数値計算により調査している。その結果、レーザの戻り光強度や注入電流を変化させることにより、カオスへと至る分岐現象を観測した。

第6章では、第4章で実験的に示したダイナミクス依存型同期に関して、相互結合された2つの半導体レーザにおける同期調査を数値計算により行っている。特に、2つのレーザ間の戻り光強度が非対称でかつレーザ2の戻り光強度とレーザ間の結合強度を同時に変化可能なモデルを提案している。LFFの発生が同期状態に与えている影響を調査するため、相互相関値および光周波数差の時間変化を算出した。その結果、レーザがLFFを示しているとき、相互相関値および光周波数差は時間的に変化することが分かった。またその変化は、LFFの出力強度の時間変化に対応していることも明らかになった。本研究では、非対称な戻り光を有するレーザにおけるLFFの発生に起因してダイナミクス依存型同期が発生することが分かった。

第7章では、本論文の全体の結論を述べている。

本研究で得られた知見は、結合された半導体レーザをはじめとする結合システムの非線形ダイナミクスおよび同期現象の深い理解に到達しており、非線形・複雑系科学における学術的基礎研究としての価値が高い。さらには、短い外部共振器長を有する光集積回路等の小型光学デバイスの性能向上に関する研究や、複雑系フォトニクスの性質を活用したダイナミカル情報処理および高速意思決定の物理実装のための重要な成果であると期待される。

## 論文の審査結果の要旨

学位論文審査委員会は、平成 31 年 2 月 4 日に論文発表会を開催し、論文内容の発表に続いて詳細な質疑と論文内容の審査を行った。以下に審査結果を要約する。

結合系における非線形振動子は多様な振る舞いを示し、特に近年、半導体レーザにおけるカオス現象が急速に発展している。半導体レーザにおけるカオス現象は、自身の光を戻り光としてフィードバックすることにより、GHz オーダの高速なカオス振動が発生することが大きな特徴である。さらに、半導体レーザを光結合することによるカオス同期現象も近年非常に注目されている。半導体レーザにおける同期現象は、現象理解の観点の学術的基礎研究のみならず、情報セキュリティ分野や機械学習や意思決定等の情報処理への工学的応用に関する研究が提案されている。半導体レーザカオスの高速かつ不規則なカオス振動を利用して、Tb/s オーダの生成速度を有する高速物理乱数生成への応用が行われている。また、レーザや光検出器を同一基板上に集積化することにより、外部共振器長を mm オーダまで短くした光集積回路が提案されており、高速物理乱数生成や非線形ダイナミクスの現象理解に関する研究も行われている。

戻り光を有する半導体レーザの非線形ダイナミクス的一种に、LFF (Low-frequency fluctuations) と呼ばれる低周波不規則振動現象が知られている。LFF のダイナミクスについて実験的および理論的に多くの研究が行われており、広く注目されている。さらに近年では、結合された半導体レーザの LFF におけるカオス同期に関する調査が行われている。一方で、半導体レーザにおける同期調査は、結合距離が長い場合の調査が多く、短い外部共振器長を有する光集積回路における同期に関する報告例は少ない。特に、相互に結合された半導体レーザを有する光集積回路におけるカオス同期の観測は未だ達成されておらず、周期振動の同期のみに留まっている。この理由として、外部共振器長が短い場合ではレーザの緩和振振周波数と外部共振周波数の非線形相互作用が得られにくく、カオス振動が発生しづらい点が挙げられる。また、非対称システムにおけるカオス同期現象に関する研究も行われている。しかしながら、非対称な結合システムにおける半導体レーザのダイナミクスおよび同期現象に関する調査は未だに十分ではない。さらに、結合された半導体レーザの非線形ダイナミクスと同期状態との関係性については未だ報告されていない。

そこで本研究では、相互に結合された半導体レーザの非線形ダイナミクスおよびカオス同期現象を実験および数値計算により調査することを目的とする。はじめに、短い外部共振器長における 1 つの半導体レーザの非線形ダイナミクスの分岐現象に関する調査を行う。次に、2 つの半導体レーザが相互結合された光集積回路の同期調査を行う。特に、2 つのレーザのダイナミクスの変化が同期状態に与える影響を調査する。さらに、実験結果の再現および物理的メカニズムの解明のための数値モデルを提案し、レーザの出力強度や相互相関値、光周波数差の時間変化に着目して、非線形ダイナミクスと同期状態の依存性について調査する。加えて、非対称なパラメータ設定における同期状態への影響についても議論する。

第 1 章では、本研究の背景、目的、および本論文の構成を述べている。

第 2 章では、本論文の序論として、短い外部共振器長を有する光集積回路の非線形ダイナミクスおよび高速物理乱数生成等の応用例や、結合された半導体レーザにおける様々な同期現象について述べている。

第 3 章では、短い外部共振器長を有する光集積回路における非線形ダイナミクスを実験的に調査している。各ダイナミクスの特徴について述べ、7 種類のダイナミクスに分類を行っている。また、パラメータ変化に対する 2 次元分岐図の作成を行い、各ダイナミクスの発生領域を明らかにしている。さらに、2 つの半導体レーザが相互結合された光集積回路に対しても同様に非線形ダイナミクスの実験的調査を行っている。

第 4 章では、相互結合型光集積回路を用いてカオス同期の調査を実験的に行っている。まず、2 つのレー

ザの注入電流変化に対するカオス同期の観測および達成条件の調査を行っている。その結果、一方のレーザの注入電流が発振しきい値電流付近の場合や、2つのレーザ間で非対称に電流を注入した場合に、高い相関値が観測できることが分かった。次に、LFFにおけるカオス同期の調査として、レーザの時間波形にローパスフィルタを適用することにより、元の信号と低周波成分であるフィルタ適用後の信号の各々に対して同期調査を行っている。その結果、着目する周波数成分により異なる同期状態を観測した。また、この現象は2つのレーザのダイナミクスの変化が関係しており、特に高速なカオス振動と低周波成分であるLFFの発生に依存して同期状態が変化することが実験的に明らかとなった。この現象を、ダイナミクス依存型同期(Dynamics-dependent synchronization)と呼び、新たな同期現象として提唱している。

第5章では、半導体レーザのレート方程式を用いて、戻り光を有する半導体レーザの非線形ダイナミクスを数値計算により調査している。その結果、レーザの戻り光強度や注入電流を変化させることにより、カオスへと至る分岐現象を観測した。

第6章では、第4章で実験的に示したダイナミクス依存型同期に関して、相互結合された2つの半導体レーザにおける同期調査を数値計算により行っている。特に、2つのレーザ間の戻り光強度が非対称でかつレーザ2の戻り光強度とレーザ間の結合強度を同時に変化可能なモデルを提案している。LFFの発生が同期状態に与えている影響を調査するため、相互相関値および光周波数差の時間変化を算出した。その結果、レーザがLFFを示している時、相互相関値および光周波数差は時間的に変化することが分かった。またその変化は、LFFの出力強度の時間変化に対応していることも明らかになった。本研究では、非対称な戻り光を有するレーザにおけるLFFの発生に起因してダイナミクス依存型同期が発生することが分かった。

第7章では、本論文の全体の結論を述べている。

以上要するに、本論文では、短い外部共振器長を有する光集積回路を用いて非線形ダイナミクスと同期の関係について実験的調査を行い、ダイナミクス依存型同期と呼ばれる新たな同期現象を発見した。さらに数値解析により本現象の再現に成功し、ダイナミクス依存型同期現象の原理や条件を明らかにした。

本論文の主な内容は、査読制のある学術論文誌に4編の学術論文として出版されており、うち2編が筆頭著者である。また筆頭著者として、査読付き国際会議にて3編の口頭発表を行っている。

本研究で得られた知見は、結合された半導体レーザをはじめとする結合システムの非線形ダイナミクスおよび同期現象の深い理解に到達しており、非線形・複雑系科学における学術的基礎研究としての価値が高い。さらには、短い外部共振器長を有する光集積回路等の小型光学デバイスの性能向上に関する研究や、複雑系フォトリソグラフィの性質を活用したダイナミカル情報処理および高速意思決定の物理実装のための重要な成果であると期待される。従って、本学位論文審査委員会は、本論文が、博士(工学)の学位を授与するに十分に値するものと認め、「合格」と判定した。