

氏 名	荒幡 真也
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記番号	博理工甲第 1016 号
学位授与年月日	平成 28 年 3 月 24 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	ブロードエリア半導体レーザにおける時空カオス光の位相ダイナミクス
論文審査委員	委員長 教 授 内田 淳史 委 員 教 授 久野 義徳 委 員 教 授 重原 孝臣 委 員 教 授 島村 徹也 委 員 教 授 小柴 健史

論文の内容の要旨

ブロードエリア半導体レーザは、通常の半導体レーザの発光領域幅を横方向に拡張することにより、高出力化を達成した光デバイスである。特にレーザ加工やレーザディスプレイへの応用が期待されている。ブロードエリア半導体レーザはその拡張された発光領域幅のために、空間的な自由度が追加され時空間ダイナミクスが発生する。特に、フィラメンテーション発振と呼ばれる時空間ダイナミクスは横モードの多重化の原因であり、レーザのビーム品質の低下を招くことが問題となる。そこで実際のレーザ加工等の応用に向けて、レーザビームの安定化のための研究がこれまでに行われてきた。一方で、フィラメンテーションの振動周波数は 10 GHz を超える時空カオスであり、この時空間不規則振動を用いることで半導体レーザカオスを用いた高速物理乱数生成への応用が可能であると考えられる。

半導体レーザカオスを用いた高速物理乱数生成は、Gb/s を超える物理乱数の生成が可能となる技術である。本手法をブロードエリア半導体レーザに適用する場合、ブロードエリア半導体レーザの光出力を空間的に分割し抽出することで、別々のカオスの振動を有する部分出力光強度が得られる。そのため 1 つのレーザから空間的に独立した乱数生成が可能であり、乱数源の空間並列化が実現できると期待される。この際に問題となるのが、空間的に抽出した部分強度間における時間振動波形の位相関係である。もしも部分強度間に位相ダイナミクスが存在している場合、生成された乱数間に相関が生まれ、乱数の質の低下を招くことが懸念される。

これまでに多重縦モード固体レーザや半導体レーザにおいて反位相ダイナミクスが観測されている。観測された位相ダイナミクスは周波数依存性を有しており、レーザの固有振動周波数である緩和発振周波数に対応する振動成分は同位相ダイナミクスを示すことが知られている。一方で、それ以下の周波数成分では反位相ダイナミクスの弱め合いが発生し、全強度のみを観測すると低周波数成分が消失して緩和振動のみが観測されることが報告されている。一方で、空間的自由度を有するブロードエリア半導体レーザにおいて、位相ダイナミクスはこれまでに調査されていない。

そこで本研究では、ブロードエリア半導体レーザの時空カオス光における位相ダイナミクスを、実験および数値計算により調査することを目的とする。特に光ビームをスリットを用いて空間的に分割することで部

分強度を観測し、部分強度間の各周波数成分における位相ダイナミクスを調査する。また、ブロードエリア半導体レーザを記述する偏微分方程式を数値的に解くことで、ブロードエリア半導体レーザの位相ダイナミクスを数値解析により調査する。また得られた数値結果を実験結果と比較し、その傾向が一致するかどうかを調査する。

第1章においては、本研究の背景、目的および本論文の構成について述べている。

第2章においては、本研究の序論として半導体レーザカオスやブロードエリア半導体レーザ、およびフィラメンテーションについて述べている。

第3章においては、本研究の実験に関してブロードエリア半導体レーザの基礎特性について記述している。ブロードエリア半導体レーザの注入電流変化時のダイナミクスの変化や、レーザ発光直後の光強度分布である近視野強度分布について調査している。また、注入電流変化時あるいは温度変化時の光スペクトルの変化を示している。

第4章においては、ブロードエリア半導体レーザの位相ダイナミクスの観測実験について記述している。ブロードエリア半導体レーザの光ビームに対して、スリットを用いることで空間的に分割して部分強度を得る。また位相ダイナミクスを判定するために、部分強度の和を計算し全強度と比較することで、周波数成分に対する位相ダイナミクスを調査する。その結果、レーザの固有振動周波数である緩和発振周波数付近において同位相ダイナミクスが観測され、それ以上の周波数成分において反位相ダイナミクスが観測された。このような特徴は従来の固体レーザや半導体レーザにおいて観測された反位相ダイナミクスとは異なる特徴を有していることを発見した。

第5章においては、ブロードエリア半導体レーザの位相ダイナミクスの数値解析について記述している。第4章で観測された特徴を数値計算により再現するために、ブロードエリア半導体レーザを記述する偏微分方程式を数値的に解くことで調査する。その結果、緩和発振周波数付近の低周波数成分において同位相ダイナミクスが観測され、それ以上の周波数において反位相ダイナミクスが観測された。以上より、実験結果と数値計算結果との間に同様の傾向が得られた。

第6章においては、結合されたブロードエリア半導体レーザのカオス同期について記述している。ブロードエリア半導体レーザを一方向に結合し、インジェクションロッキングにより光スペクトルが一致するように波長のパラメータ制御を行うことで、カオス同期を達成する。その結果、多モード発振するブロードエリア半導体レーザにおいてもインジェクションロッキングが達成でき、カオス同期が観測できることが明らかとなった。

最後に第7章においては、本論文で得られた結果をまとめている。

本研究で得られた知見は、ブロードエリア半導体レーザの時空カオス光の位相ダイナミクスの解明において重要な意義があると考えられる。また応用上では、高速物理乱数の並列生成の際に位相ダイナミクスを制御する上で有用であると期待できる。

論文の審査結果の要旨

学位論文審査委員会は、平成 28 年 2 月 8 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。

ブロードエリア半導体レーザはレーザ加工やレーザディスプレイへの応用が期待されており、通常の半導体レーザの発光領域幅を横方向に拡張した光デバイスである。その拡張された発光領域幅のために、ブロードエリア半導体レーザでは空間的な自由度が追加され時空間ダイナミクスが発生する。特に、フィラメンテーション発振と呼ばれる時空間ダイナミクスは横モードの多重化の原因であり、レーザのビーム品質の低下を招くことが問題となる。そこで実際のレーザ加工等の応用に向けて、レーザビームの安定化のための研究がこれまでに行われてきた。一方で、フィラメンテーションの振動周波数は 10 GHz を超える時空カオスであり、この時空間不規則振動を用いることで半導体レーザカオスを用いた高速物理乱数生成への応用が可能であると考えられる。

レーザカオスを用いた高速物理乱数生成は、Gb/s を超える物理乱数の生成を実現可能とする。本手法をブロードエリア半導体レーザに適用する場合、ブロードエリア半導体レーザの光出力を空間的に分割し抽出することで、別々のカオスの振動を有する部分出力光強度が得られる。そのため 1 つのレーザから空間的に独立した乱数生成が可能であり、乱数源の空間並列化が実現できると期待される。この際に問題となるのが、空間的に抽出した部分強度間における時間振動波形の位相関係である。もしも部分強度間に位相ダイナミクスが存在している場合、生成された乱数間に相関が生まれ、乱数の質の低下を招くことが懸念される。

従来研究において、多重縦モード固体レーザや半導体レーザにて反位相ダイナミクスが観測されている。観測された位相ダイナミクスは周波数依存性を有しており、レーザの固有振動周波数である緩和発振周波数に対応する振動成分は同位相ダイナミクスを示すことが知られている。一方で、それ以下の周波数成分では反位相ダイナミクスの弱め合いが発生し、全強度のみを観測すると低周波数成分が消失して緩和振動のみが観測されることが報告されている。しかしながら、空間的自由度を有するブロードエリア半導体レーザにおいて、位相ダイナミクスはこれまでに調査されていない。

以上を踏まえて、本研究ではブロードエリア半導体レーザの時空カオス光における位相ダイナミクスを、実験および数値計算で調査することを目的とする。特に光ビームをスリットで空間的に分割することで部分強度を観測し、部分強度間の各周波数成分における位相ダイナミクスを調査する。また、ブロードエリア半導体レーザを記述する偏微分方程式を数値的に解くことで、ブロードエリア半導体レーザの位相ダイナミクスを数値解析により調査する。また得られた数値結果を実験結果と比較し、その傾向が一致するかどうかを調査する。

1 章では、本研究の背景、目的および本論文の構成について述べている。

2 章では、本研究の序論として半導体レーザカオスやブロードエリア半導体レーザ、およびフィラメンテーションについて述べている。

3 章では、本研究の実験に関してブロードエリア半導体レーザの基礎特性について記述している。ブロードエリア半導体レーザの注入電流変化時のダイナミクスの変化やレーザ発光直後の光強度分布である近視野強度分布について調査している。また、注入電流変化時あるいは温度変化時の光スペクトルの変化を示している。

4 章では、ブロードエリア半導体レーザの位相ダイナミクスの観測実験について記述している。ブロードエリア半導体レーザの光ビームに対して、スリットを用いることで空間的に分割して部分強度を得る。また

位相ダイナミクスを判定するために、部分強度の和を計算し全強度と比較することで、周波数成分に対する位相ダイナミクスを調査する。その結果、レーザの固有振動周波数である緩和発振周波数付近において同位相ダイナミクスが観測され、それ以上の周波数成分において反位相ダイナミクスが観測された。このような特徴は従来の固体レーザや半導体レーザにおいて観測された反位相ダイナミクスとは異なる特徴を有していることを発見した。本現象は、ブロードエリア半導体レーザの活性層方向の空間的ダイナミクスに起因していると考えられる。

5章では、ブロードエリア半導体レーザの位相ダイナミクスの数値解析について記述している。4章で観測された特徴を数値計算により再現するために、ブロードエリア半導体レーザを記述する偏微分方程式を数値的に解くことで調査する。その結果、緩和発振周波数付近の低周波数成分において同位相ダイナミクスが観測され、それ以上の周波数において反位相ダイナミクスが観測された。以上より、実験結果と数値計算結果との間に同様の傾向が得られた。

6章では、結合されたブロードエリア半導体レーザのカオス同期について記述している。ブロードエリア半導体レーザを一方向に結合し、インジェクションロッキングにより光スペクトルが一致するように波長のパラメータ制御を行うことで、カオス同期を達成する。その結果、多モード発振するブロードエリア半導体レーザにおいてもインジェクションロッキングが達成でき、カオス同期が観測できることが明らかとなった。

最後に7章では、本論文で得られた結果をまとめている。

以上要するに、本論文ではブロードエリア半導体レーザの時空カオスの位相ダイナミクスの実験的解明を行った。特に、緩和発振周波数以上の周波数成分における反位相ダイナミクスを観測し、従来報告されている位相ダイナミクスとは異なる現象を新たに発見した。さらに本現象を数値計算にて再現することに成功した。加えて、結合されたブロードエリア半導体レーザにおけるカオス同期を実験的に達成した。

本論文の主な内容は、査読制のある学術論文誌に3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2編の口頭発表を行っている。

本研究で得られた知見は、ブロードエリア半導体レーザの時空カオス光の位相ダイナミクスの解明において重要な意義があると考えられる。また応用上では、高速物理乱数の並列生成の際に位相ダイナミクスを制御する上で有用であると期待できる。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。