

氏名	サジュ スビン SAJU SUBIN
学位(専攻分野)	博士(学術)
学位記番号	博 1 2 0 4 号
学位授与の日付	令和 8 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	工芸科学研究科 物質・材料化学専攻
学位論文題目	Nonlinear dynamic signal generation using photorefractive two wave mixing process (フォトリフラクティブ二波混合過程を用いた非線形動的信号生成)
審査委員	(主査) 准教授 木梨 憲司 教授 坂井 亙 教授 栗辻 安浩

論文内容の要旨

非線形動力学系は、周期運動、多周期振動、カオスに至るまで多様で複雑な時間応答を示すことが知られており、近年では物理リザバーコンピューティングやアナログ光計算への応用が注目されている。とくに光学系は超高速応答性と広帯域性を有し、精密な制御が可能であることから、非線形信号生成プラットフォームとして有望である。中でもフォトリフラクティブポリマーは、光励起キャリアの移動、空間電荷電場の形成、電気光学効果による屈折率変調が相互作用することで、時間的に豊かな非線形応答を示す。しかし、従来の研究は主として定常状態に焦点を当てており、過渡的ダイナミクスの制御やその応用展開については十分な体系化がなされていなかった。

本研究では、二光波混合過程に外部電場摂動を導入し、非線形時間ダイナミクスを制御可能な形で生成・解析することを目的とした。特に、正弦波変調電場を精密な制御パラメータとして用いることで、周期状態から多周期状態、さらにカオス状態へと至る分岐挙動を数値解析および実験の両面から体系的に検証した。また、ポリ(N-ビニルカルバゾール)(PVCz)を基盤とするフォトリフラクティブ複合膜を作製し、実験的に複雑信号生成を議論した。さらに、光学位相変調を導入することで、電場摂動と光学制御の複合効果についても検討した。

本論文は全七章で構成され、各章の内容は以下のとおりである。

第 1 章では、研究背景および動機について述べ、非線形動力学とフォトリフラクティブ効果の関連性、本研究の目的および位置づけを明確に示した。

第 2 章では、非線形動力学の数学的基礎、分岐理論、リアプノフ指数やコルモゴロフエントロピーなどの複雑性指標を整理するとともに、フォトリフラクティブ効果および二光波混合過程の物理機構と先行研究を総括した。

第 3 章では、外部電場摂動下における TWM 系の数値シミュレーションを行い、周期倍化分岐を経由したカオス発生機構を明らかにした。分岐図およびリアプノフ指数解析により、状態遷移を定量的に評価した。

第 4 章では、PVCz 系高分子光屈折性複合材料の構成要素および作製方法を示し、二光波混合

および縮退四光波混合特性を評価した。また、材料特性と動的応答との関係を明確にした。

第5章では、外部正弦波電場を印加した TWM 実験を実施し、出力ビーム強度の時間発展を測定した。時系列解析、位相空間再構成、相関次元解析を通じて、数値予測との整合性を検証した。

第6章では、光学位相変調を導入した場合の非線形ダイナミクス変化を解析し、電場振幅・周波数および位相変調条件がアトラクタ構造や系の複雑性に与える影響を明らかにした。

第7章では、本研究の成果を総括するとともに、時間ダイナミクス解析の空間拡張や光リザバーコンピューティングへの応用可能性について展望を述べ、本論文を締めくくった。

論文審査の結果の要旨

非線形動力学は、周期振動から多周期運動、さらにはカオスに至る多様で複雑な時間応答を示す現象であり、近年は物理リザバーコンピューティングやアナログ光計算など新たな情報処理基盤への応用が期待されている。とくに光学系は超高速応答性と高い並列性、広帯域性を備え、制御可能な非線形ダイナミクス生成基盤として有望である。フォトリフレクティブ二光波結合系は、光励起キャリアの生成・輸送、空間電荷電場形成、電気光学効果による屈折率変調が相互作用することで豊かな時間応答を示すが、従来は主に定常状態に焦点が当てられ、過渡的ダイナミクスの制御や応用検討は十分でなかった。

申請者は、二光波結合過程に外部正弦波変調電場を導入し、これを制御パラメータとして周期状態から多周期、カオス状態へ至る非線形遷移を理論・実験の両面から体系化した。数値解析により周期倍化分岐を経るカオス発生機構を明らかにし、分岐図およびリアプノフ指数解析でダイナミクス変化を定量評価した。その結果、電場振幅の増大に伴いアトラクタ次元とエントロピーが増加することを示し、外部摂動による非線形制御の有効性を示した。さらに、ポリ(N-ビニルカルバゾール)を基盤とする複合材料を用いて実験系を構築し、電場振幅・周波数を変化させながら出力強度の時間応答を測定した。位相空間再構成や相関次元、リアプノフ指数、コルモゴロフエントロピー解析により評価した結果、数値予測と一致する周期からカオスへの遷移を再現性良く観測し、理論と実験の対応を明確に示した。加えて光学位相変調を導入し、電場摂動との複合効果を検討した。その結果、位相条件によりアトラクタ構造や時間応答が変化することを示し、二光波結合系が多次元非線形信号生成器として機能し得ることを実証した。外部電場と光学位相の二重制御により非線形状態の可制御性と拡張性を高めた点は独創的である。

以上より、申請者はフォトリフレクティブ二光波混合系における過渡的非線形ダイナミクス制御を体系的に解明し、光リザバーコンピューティングやニューロモルフィック光情報処理への応用に資する知見を提供した。

本論文の基礎となった学術論文2編はいずれも査読付き国際誌に掲載され、申請者が筆頭著者として中心的役割を担っている。

[主論文]

1. Subin Saiu, Kenji Kinashi, Naoto Tsutsumi, Wataru Sakai, and Boaz Jessie Jackin, "Period-Doubling Route to Chaos in Photorefractive Two-Wave Mixing", *Photonics*, 11(6),

521 (2024).

2. Subin Saiu, Ryuya Sawa, Kenji Kinashi, Naoto Tsutsumi, Wataru Sakai, Takafumi Sassa, and Boaz Jessie Jackin, “Controlled generation of nonlinear dynamic signals in a perturbed photorefractive two-wave mixing process”, *Optics Express*, 33(25), (2025).