

氏 名	しんぐ すみっと くまる SINGH SUMIT KUMAR
学位(専攻分野)	博 士 (学 術)
学 位 記 番 号	博 1 1 3 2 号
学位授与の日付	令和 6 年 9 月 25 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	Vector holography using azo composite films for information optics (情報光学のためのアゾ複合フィルムを用いたベクトルホログラフィー)
審 査 委 員	(主査)准教授 木梨 憲司 教授 坂井 亙 教授 山雄 健史

論文内容の要旨

ホログラフィーは、高密度記録、3次元映像、ビーム成形、イメージング技術など、幅広い応用が可能な光学技術である。特に、ベクトルホログラムは、光の振幅、位相に加え、偏光状態（偏光ベクトル）も記録するホログラムであり、通常ホログラムがスカラー場（光の強度や位相）を扱うのに対し、ベクトルホログラムは光の偏光状態をも扱うため、光の振動方向も含めたより多くの情報が記録可能である。しかし、これらのホログラムを記録・再生・消去・保存を行うためには、使用される材料の記録速度、回折効率、保持時間が優れていなければならない、かつ書き換え特性も必要となる。そして、特にベクトルホログラムの記録には光の偏光状態を記録できるという特性も併せて必要となる。これらの必要条件により、多くの感光性材料はベクトルホログラムの記録には有用ではない。

本研究では、ベクトルホログラムの記録・再生・消去・保存が可能なポリマーフィルムを探索し、その特性活用した新しい高密度記録、3次元映像、ビーム成形、イメージングを目指すことを目的とする。

本論文は、七章から構成され、各章の要旨は次のとおりである。

第一章では、研究動機、研究目的、各章のアウトライン、各章の成果の概要を記載している。

第二章では、ホログラフィーの歴史と背景、ホログラフィーの基本原理解、薄膜ホログラムと厚膜ホログラムの分類、強度ホログラムと偏光ホログラムの原理、強度ホログラム用の材料、計算機合成ホログラム、ホログラムの応用例について記載している。

第三章では、アゾ複合材料を用いたベクトルホログラムの原理、アゾ複合材料の基礎物性、アゾ複合材料フィルムの作製条件、アゾ複合材料フィルム中の複屈折率の原理と測定方法、アゾ複合材料フィルムのスカラーホログラムとベクトルホログラムの原理、測定方法、結果と考察について解説し、最後に参考文献を記載している。結果として、アゾ複合材料フィルムは、顕著な複屈折性を示し、ベクトルホログラムの記録・再生に適していることを示した。スカラーホログラムにおける回折効率は、円偏光に比べて直線偏光の書き込みビームおよび読み取りビームを使用した場合に理論限界値の特性を示し、直線偏光スカラーホログラムの記録に適している

ことを示した。偏光ホログラムにおいては、円偏光ホログラムの回折効率が非常に高く、両方のタイプの偏光ホログラムの記録に適していることを示した。また、多重化にも有益となるさまざまな光学特性を明らかにした。さらに、室温から低温で記録されたホログラムの保持時間は、少なくとも200日の保存が可能であり、記録・再生・消去・保存の特性を持つことが分かった。

第四章では、多様な応用に向けたアゾ複合材料を用いた多重化ベクトルホログラムの原理、光学システム、多重化の原理、測定方法、結果と考察について解説し、最後に参考文献を記載している。結果として、データ記録に有望なハイブリッド偏光角度多重化を示し、次に、ハイブリッド空間偏光多重化を示した。ここでは、CGH（計算機合成ホログラム）を用いてさまざまな空間的に分離されたパターンを持つ複数のスカラーホログラムをアゾ複合材料フィルムに記録した結果を示した。そして、最後にハイブリッド偏光深度多重化を示した。これらの3つの革新的な書き換え可能な多重化アプローチは、データ記録、動的ディスプレイシステム、および3-Dホログラフィックディスプレイ技術のさらなる進展の可能性を示した。

第五章では、二光束干渉露光を用いた偏光多重化ホログラムのベクトル構造化光ビームの生成の原理、光学システム、測定方法、偏光多重化ホログラムのベクトル構造化光ビームの結果と考察について解説し、最後に参考文献を記載している。結果として、偏光ホログラムのテンソル理論に基づく包括的な数学モデルを提示し、提案された概念を正当化するための、検証実験結果を示した。これらの結果は、基本ポアンカレ球、高次ポアンカレ球、およびハイブリッドポアンカレ球上で表されるさまざまな種類の光渦を示した。また、ベクトルラゲールガウスビームやベクトルベッセルガウスビームなど、任意の構造を持つベクトルビームの生成にも成功しており、この方法が複雑な構造化された光を生成する特性を有していることを示した。

第六章では、単一光記録技術を用いた構造化光ビームの生成の原理、光学システム、測定方法、ベクトル構造化光ビームの結果と考察について解説し、最後に参考文献を記載している。アゾ複合材料とCGHを統合した単一光記録技術を用いて、多様な構造化された光ビームの生成に成功したことを示した。これらのビームは、フィルム上のわずか1平方ミリメートルの限られた領域内で効率的に生成できたことを示した。また、本システムは、4f光学系のような複雑な光学装置を必要とせず簡単に再構成できることが強調されており、この手法の簡便さを示している。さらに、このシステムは拡張性に優れており、多数のビームを生成できるため、その実用性の高さを示した。

第七章では、第二章から第六章までの結論をまとめるとともに、本研究における今後の展望を述べ、本論文の結びとしている。

論文審査の結果の要旨

ホログラフィーは、高密度記録、3次元映像、ビーム成形、イメージング技術など幅広い分野で応用が期待されており、中でも光の振幅、位相、そして偏光状態（偏光ベクトル）という三つの光学特性を記録し再現できる特殊なベクトルホログラムを記録・再生するため感光性材料が求められている。

本研究では、ベクトルホログラムの記録と再生に適した光感応性ポリマーの探索を行い、次世代の高密度記録、3次元映像、ビーム成形、イメージング技術を光学、光物理化学、高分子材料

化学の観点から検討した。

本研究では、アゾ複合材料フィルムを、以下の3種の情報光学で利用することを検討し、その研究成果を数学的解釈から実際まで詳細に説明した。1)「ハイブリッド偏光-角度多重化」。2)「ハイブリッド空間-偏光多重化」および「ハイブリッド偏光-深さ多重化」。3)「2つの異なる光学技術を用いた構造化した光ビーム生成」。また、数学的理論計算で予測したベクトルホログラムと同様の結果をアゾ複合材料中に作製することに成功した。このベクトルホログラムは熱的に安定であり、多重記録も可能であることを示し、最後に単一光記録システムの構築に取り組み、あらゆる構造化された光の作製に成功し、そのデモンストレーションを行い、その結果を詳細に報告した。

以上の申請者により実施された情報光学にむけたアゾ複合材料を用いたベクトルホログラフイーに関する研究は、高密度記録、3次元映像、ビーム成形、イメージング技術に対して貢献でき、さらに世界の掲げる SDGs (Sustainable Development Goals : 持続可能な開発目標) の「産業と技術革新の基盤をつくろう」に対しても貢献可能な取り組みであり学術的、産業的、社会的に高く評価できる。

本学位論文の基礎となった学術論文4編は、査読制度の確立した学術雑誌に掲載されており、いずれも申請者が筆頭著者である。また、参考論文として学術雑誌に掲載済みの学術論文(査読あり・筆頭著者)1編があり、本論文に関連した内容が記述されている。

[主論文]

1. S. K. Singh, H. Haginaka, B. J. Jackin, K. Kinashi, N. Tsutsumi & W. Sakai, “Generation of Ince-Gaussian beams using Azocarbazole polymer CGH”, *Journal of Imaging*, 8(5), 144, (2022).
DOI: 10.3390/jimaging8050144
2. S. K. Singh, K. Kinashi, N. Tsutsumi, W. Sakai & B. J. Jackin, “Azo-carbazole copolymer-based composite films for rewritable vector holograms”, *Optical Materials Express*, 14(2), 277-292, (2024). DOI: 10.1364/OME.510788
3. S. K. Singh, S. Notte, R. Yamaguchi, K. Kinashi, N. Tsutsumi, W. Sakai, Y. Awatsuji & B. J. Jackin, “Generation of arbitrary vector vortex beams on a higher-order Poincaré sphere using a double-exposure polarization-multiplexed hologram”, *Optics Letters*, 49(4), 1053-1056, (2024). DOI: 10.1364/OL.510177
4. S. K. Singh, K. Kinashi, N. Tsutsumi, W. Sakai & B. J. Jackin, “High-density polarization multiplexed holograms using azo-carbazole films for diverse applications”, *Optics Express*, 32(13) (2024), 22602-22614. DOI: 10.1364/OE.522262

[参考論文]

5. S. K. Singh, K. Kinashi, N. Tsutsumi, W. Sakai & B. J. Jackin, “Tailoring arbitrary large vectorial structured light beam array utilizing the tensor theory of multiplexed polarization hologram”, *Optics Express*, 32(18), 31162-31178, (2024). DOI: 10.1364/OE.529943