OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Volume holographic optical elements using patterned chiral liquid crystals
Author(s)	趙, 成龍
Citation	大阪大学, 2021, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/85248
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

Form 3

Abstract of Thesis

Name (趙 成龍)	
Title	Volume holographic optical elements using patterned chiral liquid crystals (パターン配向カイラル液晶を用いた体積ホログラフィック光学素子に関する研究)

Abstract of Thesis

In this dissertation, I investigate and fabricate advanced volume holographic optical elements (HOEs) using self-organized chiral liquid crystals (LCs). Two types of chiral LCs are used in this study; one is cholesteric liquid crystals (ChLCs) with one-dimensional (1D) helical structures, and the other is blue phases (BPs) that possess three-dimensional (3D) cubic structures. The HOEs operate based on Bragg-Berry (BB) effect for which the reflected optical phase is controlled from 0 to 2π radians by spatially modulating the molecules alignment of LC structures from 0 to π radians on a substrate through photoalignment technology. Various methods to manipulate the structures of chiral LCs are described to achieve desired optical effects. The chiral LCs has a number of advantages such as circular-polarization (CP) selectivity, tunable optical effect through external stimuli, and simple fabrication process due to self-organization into chiral nanostructures, which are distinct from other technologies such as conventional HOEs and metamaterials, and are described in the following chapters.

In chapter 1, the background, purpose and overview of the dissertation are described. An introduction to diffractive optical elements such as conventional volume HOEs and chiral LC-based HOEs, and the fundamental optical properties of chiral liquid crystals is also described.

In chapter 2, a completely transparent computer-generated hologram (CGH) in visible light region is realized by employing a ChLC that reflects only infrared light. Because ChLCs have a sinusoidal dielectric tensor distribution along the helical axis, they possess only a single Fourier component, resulting in all higher order reflections to be suppressed. The simulation of Bragg reflection also shows that the higher-order reflections are suppressed for all angles of incidence accessible from free-space. Using the ChLC, a transparent CGH is fabricated through the BB effect – the reflected optical phase is controlled from 0 – 2π radians by varying the helix phase from 0 – π radians on a substrate. On the other hand, the encoded hologram is reconstructed in visible light region by illuminating light at a sufficiently large angle. Two types of optical design are used to increase the incident angle; one is to attach an index-matching prism on the device, and the other is to integrate the device with a waveguide layer.

In chapter 3, an omnidirectional CP-selective volume HOE is fabricated based on a body-centered BP I that self-organizes into 3D soft PC structure. To fabricate a phase-only hologram through the BB effect, a facile method to control two independent crystal axes of BP I on a substrate is first proposed by electric field treatment. The BP I obtained from two field-induced intermediate phases is reoriented with the (110) crystal plane parallel to the substrate and [001] crystallographic axis aligned along the surface anchoring, enabling to achieve the BB effect. The omnidirectional CP selectivity is theoretically investigated by analyzing the photonic band structure of the BP I, and experimentally demonstrated by measuring the angular dependence of Bragg reflection using a homogeneously aligned BP I. The encoded hologram is reconstructed for only a CP light upon all angles of incidence with dichroic ratio of >85:1. The realization of omnidirectional CP-selective device is extremely difficult using conventional HOEs or metamaterials because the complex designs and fabrication processes of 3D structures are required.

In chapter 4, an emission direction-controllable PC band-edge laser is proposed using a ChLC-based HOEs. In addition to the periodic modulation in periodic dielectric tensor along the helical axis, a short-pitch modulation of the LC directors is introduced in a direction perpendicular to the helical axis through polarization holography method, resulting in the cavity responsible for laser oscillation to be tilted from the device normal. Using the ChLC, a PC band-edge laser is realized with an emission angle of approximately 30° from device normal in free-space. In addition, we theoretically predict that emission angle can be tuned by modulating the helical pitch through external stimuli, and experimentally fabricate a PC laser with tunable emission angle of approximately 4°. The device proposed possesses additional advantages such as circular-polarized emission and only a single beam emission, which can be applied to various applications such LiDARs and holography.

In chapter 5, The results and findings obtained in Chapters 2–4 are summarized, and main concluding remarks are described. Further works, various expected applications, prospect are also discussed.

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　趙　成龍　）			
論文審査担当者	（職）	氏　名	
	主査	教　授	尾﨑　雅則
	副査	教　授	片山　竜二
	副査	講　師	吉田　浩之
	副査	教　授	森　勇介
	副査	教　授	片山　光浩
	副査	教　授	近藤　正彦
	副査	教　授	森　伸也
	副査	教　授	廣瀬　哲也
	副査	教　授	八木　哲也

論文審査の結果の要旨

本論文は、自己組織的に螺旋周期構造を形成するカイラル液晶を用いて、基板面上での分子配向方位を制御するパターン配向技術を導入することによる体積ホログラフィック光学素子を提案し、その動作実証を理論的、実験的に行った成果をまとめたものであり、以下の 5 章から構成されている。

第 1 章では、螺旋周期構造を有するカイラル液晶とそれを用いた体積ホログラムに関する基本概念を概説し、本研究の目的および本論文の概要を述べている。

第 2 章では、一次元螺旋周期構造を形成するコレステリック液晶を自己組織化ブラッグ反射鏡にとして採用し、ベリー（幾何学的）位相に基づいた、可視光域で完全に透明な反射型計算機生成ホログラムを提案、実証している。まず、コレステリック液晶を用いたブラッグ反射鏡が、螺旋誘電テンソル分布を持つことから単一周期のフーリエ成分のみを持ち高次の反射が抑制されることを示し、反射バンドを可視光波長範囲外に設定することにより、完全透明素子を実現している。さらに、斜め入射の読出し光により、記録されたホログラム情報を読み出すことが可能となることを理論的に示し、結合プリズムと光導波路とを複合することにより提案したデバイスの動作を実験的に実証している。

第 3 章では、自己組織的に三次元螺旋周期構造を有するコレステリックブルー相（BP）液晶を用いた、入射方向に依存しない選択反射体積ホログラムを提案、実証している。まず、ベリー位相効果に基づく位相ホログラムを実現するために、BP の結晶方位を電界によって制御する方法を提案している。電界印加により BP の（110）面が基板に平行で、[001]軸を基板面上の配向容易軸に沿って配列させることに成功している。また、BP の方位に依存しない選択反射特性について、BP のフォトニックバンド構造の理論的解析により検討を行うとともに、ブラッグ反射の角度依存性の測定により実験的に検証を行っている。あらゆる入射角の円偏光に対して、85：1 以上の円偏光二色性比を有するホログラムの再生に成功している。

第 4 章では、傾斜した螺旋構造を有するコレステリック液晶体積ホログラムを用いて、出射ビーム方向が制御可能なフォトニックバンド端レーザーを提案、実証している。基板に垂直なコレステリック液晶の螺旋軸に沿った周期構造に加えて、螺旋軸に垂直（基板に平行）方向に液晶分子の配列に周期性を導入することにより、傾斜周期構造を実現し、その構造から基板法線に対して 30°傾いた方位へのバンド端レーザー発振を理論的、実験的に実証している。さらに、温度制御により螺旋ピッチを変調し、4°のレーザー光出射方位の制御に成功している。

第 5 章では、2 章から 4 章で得られた知見を総括し、本博士論文における結論を述べている。

以上のように、本論文は、カイラル液晶の自己組織的な螺旋周期構造に加えて、パターン配向技術を導入することにより全く新しいカイラル体積ホログラム光学素子が実現できることを提案、実証している。このことは、液晶の新規応用展開の可能性を示す極めて重要な知見を与えており電気電子情報通信工学に寄与するところが大きい。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。