

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289097

研究課題名(和文) 液晶偏光配向技術を用いた偏光干渉法による多次元異方性フォトニック素子創成

研究課題名(英文) Fabrication of multi-dimensional anisotropic photonic devices by polarization interference method using photoalignment technique of liquid crystals

研究代表者

小野 浩司(Ono, Hiroshi)

長岡技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10283029

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,600,000円

研究成果の概要(和文)： 偏光ホログラムの手法と光架橋性高分子液晶を使って液晶回折格子素子を作成する効率的高かつ実際的な方法を提案した。光架橋性高分子液晶の面内配向は、光配向過程において、直線偏光紫外光の露光量に依存して制御できた。この配向特性を応用することで、90度TN配向や0度のプラナー配向を共に混在させた様々なタイプの液晶回折格子素子を、2枚の光架橋性高分子液晶を塗布した空のセルに一度の偏光干渉露光することで形成可能であることを実証した。

さらに本研究では、3光束、4光束での偏光干渉光を光架橋性高分子液晶を塗布した空の液晶セルに一度露光するだけで、複雑な配向パターン形成を実現できることも実証している。

研究成果の概要(英文)： We propose the efficient yet practical method for fabricating the LC gratings using polarization holographic exposure and photocrosslinkable polymer LC (PCLC) synthesized by us. The in-plane alignment direction of PCLC can be controlled depending on the exposure energy of linearly polarized ultraviolet light in the photoalignment process. By applying this alignment property, various LC gratings with 90° twisted nematic (TN) alignment and 0° planar alignment can be fabricated by simultaneously irradiating an empty glass cell composed of two PCLC films with a polarized interference beam. These resultant LC gratings have various attractive polarization diffraction properties.

This study is of great significance because different two-dimensional continuous and complex alignment patterns can be produced on two alignment films by simultaneously irradiating an empty glass cell composed of two unaligned PCLC films with three- and four- beam polarized interference beam.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：液晶 回折格子 偏光 光配向 光反応性高分子液晶 光回折 光機能性高分子 分子配向

1. 研究開始当初の背景

光波は、振幅、位相、波長(周波数)、偏光、などの多彩なパラメータを持つ波動であり、これらのパラメータを高度に制御することにより、光情報処理のさらなる高度化につながると期待される。研究代表者(小野)は、光波の偏光と伝搬を高度に制御する偏光制御回折格子素子の実現を目指し、液晶分子の3次元配向分布を偏光紫外光照射によって制御を行う方法を開発すると共に、その光学特性に関する研究を進めてきた。

液晶分子配向の3次元構造を制御された異方性フォトニック素子は、「偏光変換」、「偏光分離」、「偏光検出」、等の機能を併有する多次元回折格子として機能することが期待される。このように異方性フォトニック素子は、光通信、光記録、光情報処理、光計測における偏光多重化による高機能化において重要な役割を果たすと考えられる。

2. 研究の目的

液晶分子配向を高度に制御可能な光架橋性高分子液晶による光配向技術を応用展開し、3次元の液晶分子配向構造を高度に制御した異方性フォトニック素子を形成し、光情報処理の種々の場面で展開可能な「偏光変換」「偏光分離」「偏光検出」の偏光制御機能を併有する多次元偏光回折格子素子を創成する。光架橋性高分子液晶の、①可視域で透明、②高い耐熱性、③大きな光学異方性、④露光量と偏光による高度制御、といった他の材料系にない特徴を生かし、多光束偏光干渉露光法によって、光波入射面である2次元平面内の光学異方性分布を制御することのみならず、光波伝搬方向も含めた3次元での制御を行う技術を確認する。さらに異方性フォトニック素子の偏光制御機能を偏光変換・分離・検出の観点から明らかにし、多次元偏光制御回折格子素子を実現する。

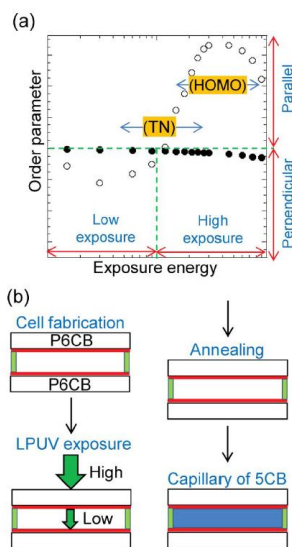
3. 研究の方法

本研究では、これまでに研究してきた光架橋性高分子液晶の高度な光配向技術(①可視域で透明、②高い耐熱性、③大きな光学異方性、④露光量と偏光による高度制御)をもとに、液晶セルにおいて液晶分子の3次元配向を制御した異方性フォトニック構造を偏光干渉露光法により創成する。まずは、2光波偏光干渉露光法によって光波伝搬方向(厚さ方向)での液晶分子の捻れ構造を含む配向構造を制御する技術の開発、およびその偏光回折特性に関する検討を適切な光配向材料の検討も含めて実施し、異方性フォトニック構造創成への知見を得る。さらに、偏光干渉露光光学系を多光束(3光束および4光束)に拡張させ、3次元的に液晶分子配向(光学異方性)が変調された異方性フォトニック構造を創成し、多次元回折および偏光制御機能(偏光変換、偏光分離、偏光検出)を有する多次元フォトニック回折格子素子を実現する。

4. 研究成果

(1) 一度露光による液晶分子配向高度制御

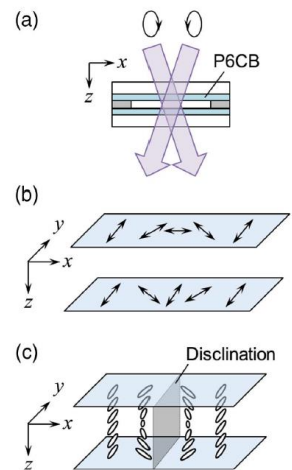
偏光を含む光波の高度制御のためには、液晶の厚さ方向の捩れ配向構造も含む3次元配向構造を高度に制御できることが望ましい。通常、このような高度制御を液晶セルで行う場合には、上下配向基板をおのおの配向処理し、位置合わせをしながら貼り合わせ、その後低分子液晶を注入する



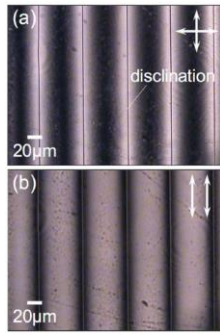
プロセスが必要となる。本研究では、そのようなプロセスではなく、一度偏光露光するだけで、90度捻れたTN配向構造と0度のHOMO配向を共存させるプロセスを開発した。我々の開発した光架橋性高分子液晶は、偏光紫外光を照射し、その後熱処理することで、液晶分子の配向が促される。その配向特性は上図(a)に示しているように、露光量の少ない領域では偏光方向と直交した方向に、露光量の多い領域では偏光方向に平行に配向する。我々はこの特性を利用して上図(b)のように上部基板と下部基板の露光量を上部基板での光吸収によって変えることで、TNとHOMOの両方の配向状態を形成できることを見いだした。

(2) 一度偏光干渉露光によるTNとHOMO混在型液晶回折格子の形成

我々が開発した一度露光によるTNとHOMO構造の高度制御技術を用いて、一度の偏光干渉露光によってTNとHOMO構造が混在する液晶回折格子素子の形成に成功した。具体的には、右図のように、楕円率を設計した互いに逆回転の楕円偏光を干渉させ(a)、偏光干渉の強度及び偏光の空間分布によって上下基板にTNおよびHOMO構造の光配向分布を形成する(b)。このような厚さ方向にも配向分布を形成したTN、HOMO混在型の液晶回折格子は、逆方向の捩れの回転方向がぶつかる点で配向欠陥(disclination line)が発生すると

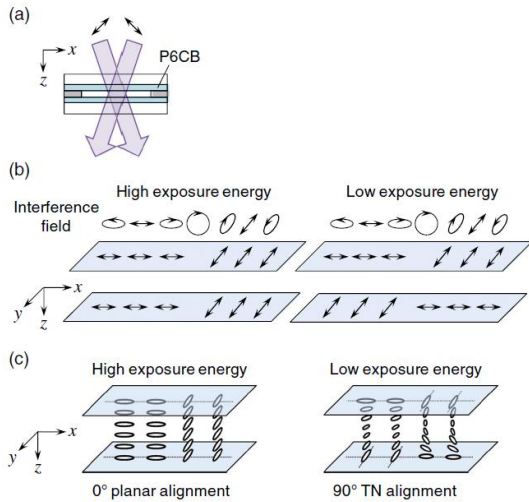


考えられる(c)。このプロセスで実際に作成した液晶回折格子の偏光顕微鏡写真を右図に示す。想定された明暗のパターンと配向欠陥が観察されており、TNとHOMO構造が混在した回折格子液晶セルを一度の偏光干渉露光で形成出来ていることがわかった。また、この回折格子の偏光変換回折特性は Jones 偏光解析法で予測される特性と一致している事が示された。

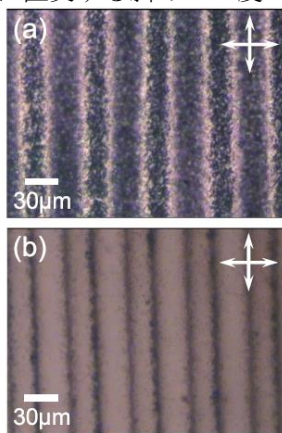


### (3) 偏光ホログラフィック露光法による2値回折格子液晶セル形成

ホログラフィックな方法での回折格子形成では、通常は位相差が連続的に変化する回折格子が形成されるが、我々が開発した光架橋性高分子液晶を用いた光配向法を応用することで、2値型(binary型)の偏光変換回折格子液晶セルを形成可能であることを実証した。



上図のように、互いに直交する斜め45度の直線偏光を干渉させると(a)、偏光干渉の強度及び偏光の空間分布と光配向膜の特性によって上下基板に2値でのTNおよびHOMO構造の光配向分布を形成する(b)(c)。このプロセスで実際に作成した液晶回折格子の偏光顕微鏡写真を右図に示す。想定された明暗のパターンが観察されており、2値でのTNおよびHOMO構造の光配向分布が形成されていることが確認されている。この回折格子の偏光変換回折特性は Jones 偏光解析法で予測される特性と一致している事が示

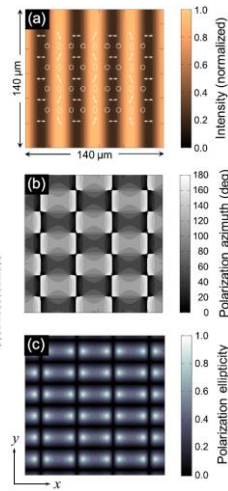
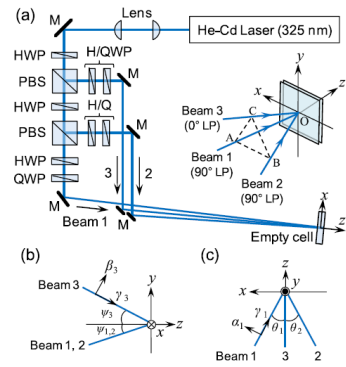


された。

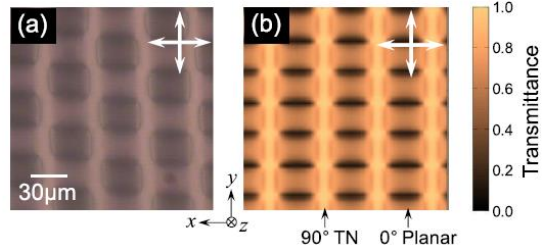
### (4) 多光束偏光干渉露光による、多次元異方性フォトニック素子創成

上記(1)~(3)の結果を踏まえて、右図に示す3光束偏光干渉露光系を形成し、面内(x-y面)と厚さ方向(z方向)の3次元液晶配向分布を有する異方性フォトニック素子を創成することを実施した。

上図の3光束偏光干渉露光系で作られる強度、偏光方位角、偏光楕円率の分布を右図に示す。



この実験で用いた3光束偏光干渉露光の条件で形成が期待される3次元の異方性フォトニック素子の配向分布を上左図に示している。



このプロセスで実際に作成した液晶回折格子の偏光顕微鏡写真を上図に示す。想定された明暗のパターンが観察されており、期待される3次元の異方性フォトニック素子が創成されているのがわかる。この回折格子の偏光変換回折特性は Jones 偏光解析法で予測される特性と一致している事が示された。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計9件)

① K. Kawai, M. Sakamoto, K. Noda, T. Sasaki, N. Kawatsuki and H. Ono, Three-dimensionally modulated anisotropic

structure for diffractive optical elements created by one-step three-beam polarization holographic photoalignment, *J. Appl. Phys.* 119 (2016) 123102.  
DOI: 10.1063/1.4944810

② M. Sakamoto, T. Sasaki, K. Noda, T. M. Tien, N. Kawatsuki and H. Ono, Three dimensional vector recording in polarization sensitive liquid crystal composites by using axisymmetrically polarized beam, *Opt. Lett.* 41 (2016) 642-645.  
DOI: 10.1364/OL.41.000642

③ K. Kawai, T. Sasaki, K. Noda, M. Sakamoto, N. Kawatsuki and H. Ono, Diffraction properties of a vector grating liquid crystal cell fabricated using a one-step exposure of a non-orthogonal elliptically polarized interference beam, *J. Opt. Soc. Am. B* 32 (2015) 2435-2440.  
DOI: 10.1364/JOSAB.32.002435

④ K. Kawai, T. Sasaki, K. Noda, M. Sakamoto, N. Kawatsuki and H. Ono, Diffraction properties of a vector grating liquid crystal cell fabricated using a one-step exposure of a non-orthogonal elliptically polarized interference beam, *J. Opt. Soc. Am. B* 32 (2015) 2435-2440.  
DOI: 10.1364/JOSAB.32.002435

⑤ K. Kawai, T. Sasaki, K. Noda, M. Sakamoto, N. Kawatsuki, and H. Ono, Holographic binary grating liquid crystal cells fabricated by one-step exposure of photocrosslinkable polymer liquid crystalline alignment substrates to polarization interference ultraviolet beam, *Appl. Opt.* 54 (2015) 6010-6018.  
DOI: 10.1364/AO.54.006010

⑥ N. Kawatsuki, K. Miyake, H. Ikoma, M. Kondo, T. Sasaki and H. Ono, In situ formation of photoalignable N-benzylideneaniline side groups and control of photoinduced reorientation in polymethacrylate with 4-oxybenzaldehyde side groups and 4-methoxyaniline composite films, *Polymer* 77 (2015) 239-245.  
DOI: 10.1016/j.polymer.2015.09.057

⑦ N. Kawatsuki, T. Washio, J. Kozuki, M. Kondo, T. Sasaki and H. Ono, Photoinduced orientation of photoresponsive copolymers with N-benzylideneaniline and nonphotoreactive mesogenic side groups, *Polymer* 56 (2015) 318-326.  
DOI: 10.1016/j.polymer.2014.11.007

⑧ K. Kawai, T. Sasaki, K. Noda, N. Kawatsuki and H. Ono, Simple fabrication of liquid crystalline grating cells with homogeneous and twisted nematic structure and effects of orientational relaxation on diffraction properties, *Appl. Opt.* 53 (2014) 3679-3686.  
DOI: 10.1364/AO.53.003679

⑨ H. Ono, M. Nishi, T. Sasaki, K. Noda, M. Okada, S. Matsui and N. Kawatsuki, Polarization-sensitive diffraction in vector gratings combined with form birefringence in subwavelength-periodic structures fabricated by imprinting on polarization-sensitive liquid crystalline polymers, *J. Opt. Soc. Am. B* 31 (2014) 11-19.  
DOI: 10.1364/JOSAB.31.000011

[学会発表] (計 8 件)

- ① 小野浩司、光波による液晶分子の 3 次元配向構造制御と偏光制御型回折格子素子形成、情報科学用有機材料 142 委員会講演会 (2016 年 1 月 26 日、東京理科大学森戸記念館)
- ② N. Kawatsuki, Y. Hashimoto, M. Kondo, T. Sasaki, and H. Ono, Photoinduced in-plane alignment of nematic LCs doped with photoalignable composite materials, IDW '15 (The 22nd International Display Workshops) (2015 年 12 月 9 日～12 月 11 日、大津プリンスホテル)
- ③ 河合孝太郎、佐々木友之、坂本盛嗣、野田浩平、川月喜弘、小野浩司、3 光束偏光干渉露光法による 3 次元液晶配向構造を有する回折光学素子の形成、Optics & Photonics Japan 2015 (2015 年 10 月 28 日～10 月 30 日、筑波大学東京キャンパス文教校舎)
- ④ K. Kawai, T. Sasaki, K. Noda, N. Kawatsuki and H. Ono, Vector grating liquid crystal cells with TN and homogeneous alignment fabricated by one-step exposure of photocrosslinkable polymer liquid crystal films to non-orthogonal elliptical interference beam, The 5th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (EM-NANO 2015) (2015 年 6 月 16 日～19 日、朱鷺メッセ)
- ⑤ 河合孝太郎、佐々木友之、野田浩平、川月喜弘、小野浩司、強度変調と偏光変調が混在した 2 光波干渉紫外光の一度露光による TN 及びホモジニアス配向が混在した



ベクトル回折格子液晶セル形成、第 62 回  
応用物理学会春季学術講演会（2015 年 3  
月 11 日-14 日、東海大学 湘南キャンパ  
ス）

- ⑥ K. Kawai, T. Sasaki, K. Noda, N. Kawatsuki  
and H. Ono, Binary Grating Liquid Crystal  
Cells Fabricated by One-Step Polarization  
Holographic Exposure on Photocrosslinkable  
Polymer Liquid Crystal Films, The 2nd Asian  
Conference on Liquid Crystals（2015 年 1 月  
19 日～21 日、釜山）
- ⑦ 河合孝太郎、坂本盛嗣、野田浩平、佐々木  
友之、川月喜弘、小野浩司、2 光波強度変  
調干渉光の一度露光によるツイストネマ  
チック配向とホモジニアス配向が混在す  
る回折格子液晶セルの形成、第 61 回応用  
物理学会春季学術講演会（2014 年 3 月 17  
日-20 日、青山学院大学相模原キャンパス）
- ⑧ 河合孝太郎、葛綿充、佐々木友之、野田浩  
平、川月喜弘、小野浩司、偏光紫外一度露  
光によるブレード型 TN 液晶回折格子セ  
ル形成、第 74 回応用物理学会秋期学術講  
演会（2013 年 9 月 16 日～20 日、同志社  
大学）

〔図書〕（計 1 件）

- ① 小野浩司、「偏光伝搬解析の基礎と応用  
（内田老鶴圃）」2015 年 4 月

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://optik.nagaokaut.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小野 浩司 (ONO, Hiroshi)  
長岡技術科学大学  
電気電子情報工学専攻・教授  
研究者番号：10283029

(2) 研究分担者

川月 喜弘 (KAWATSUKI, Nobuhiro)  
兵庫県立大学  
物質系工学専攻・教授  
研究者番号：60271201