

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 19 日現在

機関番号：82723

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820112

研究課題名(和文) 小型・低コストを実現するQスイッチ-液晶共振器からの擬似CW発振

研究課題名(英文) Quasi-CW lasing from Q-switched liquid crystal cavity allowing compact and low-cost devices

研究代表者

井上 曜 (Inoue, Yo)

防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工・その他部局等・助教)

研究者番号：30723770

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、光閉じ込め効果を有する螺旋液晶(コレステリック液晶)を用いたQ-スイッチレーザー発振を目指した研究である。これを実現するためには、液晶共振器のQ-値を高速に変化させるための技術が必要であり、液晶の電気光学効果の高速化に関する研究を主に実施した。液晶の応答速度の高速化を推し進める中で、これまで発見されてこなかった新しい高速応答成分を発見した。これは、螺旋が伸びる運動と局所的な分子の運動を分離し、後者のみを抜き出すことで得られた。このとき、螺旋軸をガラス基板に平行な方向に配列させる技術が必要となったため、せん断応力を用いた分子配向制御の研究も同時に行った。

研究成果の概要(英文)：In this study, the possibilities of Q-switched laser action in cholesteric liquid crystal (ChLC) lasers was investigated. To demonstrate Q-switched lasing, the electro-optic effect with fast response times in the ChLCs must be achieved, and thus I focused on the speeding-up technique of the response characteristics. In the process, a new fast response component was discovered, which was the microscopic molecular motion separated by removing the motion of the helical elongation. At this time, the alignment method using a shear stress was required to orient the helix axis in the cell-plane direction.

研究分野：液晶デバイス応用

キーワード：液晶レーザー コレステリック液晶

1. 研究開始当初の背景

コレステリック液晶は、棒状分子が自己組織的に一次元螺旋周期構造を形成する材料である。このような螺旋周期構造体に光が入射すると、螺旋の巻き方向と一致した円偏光成分が選択的に反射される現象が起こる(選択反射)。また、螺旋周期の長さは光の波長サイズ(数百 nm)に及ぶため可視光域に反射バンドを形成することが可能である。さらに、バンド端波長の光に対しては螺旋構造中に光を閉じ込める性質を持つため、色素を添加したコレステリック液晶を光励起することでバンド端レーザー発振が可能である。一方、コレステリック液晶は温度、光、電場、磁場などの外場に対して敏感に応答しバンド波長を変化させるため、レーザー発振波長の制御が可能であり、小型で安価な波長可変レーザーとして実用化が期待されてきた。2012年には、ケンブリッジ大学の研究グループによってベンチャーが立ち上げられ、COSMOS Lasers というブランドで販売されている。しかしながら、実際にはレーザー発振させるための励起光源として、高価(数百万以上)で30cm程度のヘッドサイズを持つパルスレーザー(参考: CryLas FDSS532-150)を必要とするため、レーザーシステム全体として決して小型で安価とは言えないのが現状である。そこで本研究では、比較的安価(数万~)でコンパクト(数cm程度)なCWレーザー光源を励起光として用いることで、レーザーシステム全体として小型で安価なコヒーレント光源を提供することを最終目標として研究を行う。このとき必要とされるのは、高速に液晶共振器のQ値を変化させることが可能な技術であり、少なくとも数十マイクロ秒以下の電気光学応答のスピードを実現する必要がある。ここで、Q値(quality factor)とは共振器の良さの指数を意味し、Q値が低い状態は共振器内の光損失が多い状態を示す。Qスイッチの手法は、光利得媒質(本研究では色素)を励起している間、わざとQ値を低い値にしておくことによって利得が大きな状態を作り、急にQ値が高い状態に引き戻すことで高い出力パルス光を得る方法である。そこで本研究では、まず、高速にQ値を変化させることが可能なコレステリック液晶の電気光学効果を見つけることから実験を始めた。

2. 研究の目的

Q-スイッチコレステリック液晶レーザーを実現させるために、高速にQ値を変化させることが可能な電気光学効果の探索を行う。また、それが可能な液晶素子構造の提案を行う。最終的に、発見された新しい電気光学効

果を用いて、Q-スイッチコレステリック液晶レーザーの実現を目標とする。

3. 研究の方法

以下に、(1)ずり流れを用いたコレステリック液晶の面内螺旋配向(Uniform lying helix:ULH)制御技術、及び(2)その面内螺旋配向素子における新しい高速応答成分の発見についての研究方法を示す。さらに上記二つとは異なるアプローチであるポリマー・コレステリック液晶複合系における高速電気光学効果の発現に関する研究について、その実験方法を示す。

(1) 二枚のITO電極つきガラス基板を用いて、5.6, 12.7, 25.0, 27.0, 40.3, 54.2 μm のセルギャップを持つサンドイッチセルを作製した。ずりを印加できるように、片側の基板はピエゾステージに接続した。コレステリック液晶は、ネマティック液晶(Merck, MLC2143)にキラル剤(LCC, CB15)を50%添加したものをを用いた。コレステリック液晶をセルのギャップに注入し、螺旋が解ける閾値電界 E_c の1.5倍である3.2 V/ μm の矩形波交流電界を印加した。その後、片側基板に正弦波状のずりを印加した。

(2) (1)で作製されたコレステリック液晶のULH配向に素子深さ方向のパルス電界を印加し、クロスニコル下に置かれた素子のHe-Neレーザー(632.8 nm)の透過率の変化を測定した。このとき、印加電界のパルス幅を短くした場合(1 ms)と長くした場合(80 s)の二種類の場合の実験を行った。

(3) 光重合性コレステリック液晶(Merck, 03-009)、ネマティック液晶(Merck, MLC-6849-100)、カイラル剤(Merck, ZLI-4572)、光重合開始剤(Ciba, Irgacure819)をそれぞれ4.7、89、5.8、0.5 wt%の割合で混合したコレステリック液晶を作製した。この材料を、水平配向処理を施した厚さ10 μm のITO電極付きガラスセルに注入し、90 $^{\circ}\text{C}$ (等方相)から-20 $^{\circ}\text{C}$ まで20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ で降温処理した液晶素子に、紫外線(365 nm, 400 mW)を照射することで光重合した。また、比較用の素子として、室温(20 $^{\circ}\text{C}$)において光重合したのも用意した。それぞれの素子において、素子厚さ方向に矩形波交流電界(1 kHz)を印加したときの反射スペクトルを測定した。また、それぞれの素子の電界印加前後における偏光顕微鏡観察像(落射照明)を測定した。

4. 研究成果

以下に(1-3)で得られた研究成果の概要を示す。それぞれの研究成果は各文末に示される学術雑誌に報告されている。

(1) ずり印加方向と偏光子が平行である場合、暗視野が得られた。一方で、ずり印加方向と偏光子が45度の角度をなす場合、明視野が

得られ、最大の透過光強度を示した。これらの結果は、一軸性を有する ULH 配向が形成されていることを示しており、また螺旋軸が偏光子に対して平行か垂直な方向にあることがわかる。補償板を用いることで、螺旋軸はずり印加方向に対して垂直な方向にあることがわかった。さらに、厚さの異なる 6 種類の素子全てにおいて、完全に均一な ULH 配向が得られた。これまで、10 mm 以上の素子厚さにおいて、均一な ULH 配向が得られた報告は無く、本実験手法は面内に螺旋軸を配向させる技術として非常に有効な方法であると言える。

関連論文 Yo Inoue et al., *Appl. Phys. Express*, **8** (2015) 071701.

(2) (1)で作製した素子厚さ 54.2 μm を持つ ULH 配向に、短いパルス幅(1 ms)を持つパルス電界を印加した場合、立ち上がり、及び立ち下りともに数十マイクロ秒の高速応答が観察された。一方で、長いパルス幅(80 s)を持つパルス電界を印加した場合、短いパルス幅を印加した時に得られたマイクロ秒の速い応答成分に加えて、数十秒程度の非常に遅い応答成分が現れた。これらの結果は、はっきりと異なる二つの応答成分があることを示している。高速成分は、螺旋ピッチを固定したままダイレクタ分布が変形する応答成分であると考えられ、一方で低速成分は、螺旋ピッチの伸張とダイレクタ分布の変形が同時に起こる応答成分であると考えられる。

関連論文 Yo Inoue et al., *Appl. Phys. Express*, **8** (2015) 061701.

(3) 室温(20 $^{\circ}\text{C}$)において光重合した素子は、電界印加に伴い、バンド形状の崩れと最大反射率の低下が観察された。一方で、低温 (-20 $^{\circ}\text{C}$)において光重合した素子は、10 V/ μm の電界強度までは最大反射率がほとんど低下することなく、バンド形状を維持したまま反射波長が変化した。また、顕微鏡観察では、室温(20 $^{\circ}\text{C}$)で光重合した素子では、電界印加に伴い縞状のドメインが観察され、さらに電界除去後に元の状態に戻らなかった。一方、低温 (-20 $^{\circ}\text{C}$)において光重合した素子は、電界印加前後で一様なテクスチャが維持され、可逆的応答を示した。これは、低温で重合した場合、重合時のモノマー分子の拡散が抑制されることで、より細密なネットワーク構造が形成され、螺旋構造の安定性が向上したためであると考えられる。特に、低温重合した素子においては 20 μs の高速な立ち下がり時間が達成されるため、本研究課題の目的である Q-スイッチングを行うのに適した電気光学効果であると考えられる。

関連論文 Hoekyung Kim, Yo Inoue et al., *Opt. Mater. Express*, **6** (2016) 705.

研究成果のまとめ：

(2-3)で得られた高速電気光学効果は Q-スイッチをかけるのに適していると考えられる。しかしながら、所属機関の異動などにより、Q-スイッチレーザー発振の研究まで到達することは出来なかった。研究課題は完全に完成はしなかったので、研究期間終了後にも、継続して本研究課題である Q-スイッチレーザー発振の研究を行っていく予定である。

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 3 件)

- ① Yo Inoue and Hiroshi Moritake
“Discovery of a transiently separable high-speed response component in cholesteric liquid crystals with a uniform lying helix”
Appl. Phys. Express, vol. 8, pp. 061701(4pages), May, 2015
- ② Yo Inoue and Hiroshi Moritake
“Formation of a defect-free uniform lying helix in a thick cholesteric liquid crystal cell”
Appl. Phys. Express, vol. 8, pp. 071701(3pages), June, 2015
- ③ Hoekyung Kim, Yo Inoue, Junji Kobashi, Yasutaka Maeda, Hiroyuki Yoshida, and Masanori Ozaki
“Deformation-free switching of polymer-stabilized cholesteric liquid crystals by low-temperature polymerization”
Opt. Mater. Express, vol. 6, pp. 705-710, February, 2016

[学会発表] (計 13 件)

- ① Yo Inoue, Hiroyuki Yoshida, and Masanori Ozaki (Poster Presentation)
“Fast electro-optic effect in polymer/cholesteric liquid crystal nanocomposite formed by low-temperature polymerization”
The 25th International Liquid Crystal Conference (ILCC), Trinity College, Dublin, Ireland, 29 June – 4 July 2014.
- ② 井上曜, 吉田浩之, 尾崎雅則 (ポスター発表 PB-29)
「膨潤したポリマー/液晶複合系の電界印加に対する分子の挙動」
2014 年日本液晶学会討論会 くにびきメッセ 2014 年 9 月 8~10 日
- ③ 井上曜, 森武洋 (口頭発表 12a-D4-1)
「ずりを用いて作製された基板面内に螺旋軸を持つコレステリック液晶」
春季第 62 回応用物理学会春季学術講演会

東海大学湘南キャンパス 2015 年 3 月
11~14 日

- ④ 井上曜、森武洋 (口頭発表 12a-D4-2)
「3 つの応答成分を持つ面内螺旋配向コレステリック液晶の電気光学効果」
春季第 62 回応用物理学会春季学術講演会
東海大学湘南キャンパス 2015 年 3 月
11~14 日
- ⑤ 井上曜 (口頭発表)
「面内螺旋配向コレステリック液晶の過渡的に分離可能な高速応答成分の発見」
第五回京都若手ソフトマター研究会 京都
大学吉田キャンパス 2015 年 3 月 13 日
- ⑥ 井上曜、森武洋 (口頭発表 1C02, 2015 年
9 月 7 日)
「コレステリック液晶の過渡的に分離可能な高速応答成分の発見」
2015 年日本液晶学会討論会 東京工業大
学 すすかけ台キャンパス 2015 年 9 月 7~9
日
- ⑦ 井上曜、森武洋 (口頭発表 3C04, 2015 年
9 月 9 日)
「厚いコレステリック液晶素子における
Uniform Lying Helix 配向の形成」
2015 年日本液晶学会討論会 東京工業大
学 すすかけ台キャンパス 2015 年 9 月 7~9
日
- ⑧ 服部真代、井上曜、森武洋 (ポスター発
表 PB-46, 2015 年 9 月 7 日)
「プラナー配向コレステリック液晶の横
電界を利用した電気光学応答」
2015 年日本液晶学会討論会 東京工業大
学 すすかけ台キャンパス 2015 年 9 月
7~9 日
- ⑨ 井上曜、森武洋 (ポスター発表
13p-PB8-13, 2015 年 9 月 13 日)
「クエット流により形成された Uniform
Lying Helix 配向」
第 76 回応用物理学会秋季学術講演会 名
古屋国際会議場 2015 年 9 月 13~16 日
- ⑩ 服部真代、井上曜、森武洋 (口頭発表
14a-2A-7, 2015 年 9 月 14 日)
「横電界を印加したプラナー配向コレス
テリック液晶の誘起複屈折特性」
第 76 回応用物理学会秋季学術講演会 名
古屋国際会議場 2015 年 9 月 13~16 日
- ⑪ Yo Inoue and Hiroshi Moritake
(INVITED Oral Talk 9769-22, February
17, 2016)
“Transiently separable high-speed
response component in cholesteric
liquid crystals”

SPIE Photonics West 2016, The
Moscone Center, San Francisco,
California, United States 13-18
February 2016.

- ⑫ 服部真代、井上曜、森武洋 (口頭発表
20a-W351-9, 2016 年 3 月 20 日)
「厚いコレステリック液晶セルを用いた
複屈折変調デバイス」
第 63 回応用物理学会春季学術講演会 東
京工業大学 大岡山キャンパス 2016 年 3
月 19~22 日
- ⑬ 井上曜、森武洋 (ポスター発表
19a-P3-29, 2015 年 3 月 19 日)
「ヘルフリッヒ変形が誘起されたコレス
テリック液晶の光学特性」
第 63 回応用物理学会春季学術講演会 東
京工業大学 大岡山キャンパス 2016 年 3
月 19~22 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上 曜 (INOUE YO)

防衛大学校・電気情報学群・助教

研究者番号：30723770