

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 8日現在

機関番号：82723

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760237

研究課題名（和文） 光ファイバの閉じ込め効果を利用した
高効率な液晶フォトニック結晶共振器の開発研究課題名（英文） Development of a liquid crystal optical resonator
coupled with optical confinement of a hollow fiber

研究代表者

尾崎 良太郎（OZAKI RYOTARO）

防衛大学校・電気情報学群・助教

研究者番号：90535361

研究成果の概要（和文）：

コレステリック液晶は自己組織的なフォトニック結晶として注目されている液晶材料である。本研究では、コレステリック液晶を中空ファイバに注入することで、高次の閉じ込め効果を実現することを試みた。バルクでは一次元周期構造をとるコレステリック液晶は、ファイバ内では二次元的な配向となることが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：

Cholesteric liquid crystals, which have a helical structure formed by self-assembly, have recently attracted much attention because their helical structure can be regarded as a one-dimensional pseudo-photonic crystal. In this research, the optical confinement of a cholesteric liquid crystal in an optical hollow fiber is investigated. The cholesteric liquid crystal, which has a one-dimensional orientation, is oriented in two-dimension in the hollow fiber. This indicates that the hollow fiber structure enables to create a higher order structure for cholesteric liquid crystals.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,700,000	0	2,700,000
2011年度	500,000	0	500,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	0	3,200,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子・電気材料工学

キーワード：液晶、フォトニック結晶、光共振器

1. 研究開始当初の背景

液晶は、大きな屈折率異方性を持つことから偏光制御・光スイッチング・位相制御など機能性光学素子に欠くことのできない材料となっている。最近ではコレステリック液晶と呼ばれる螺旋構造をもつ液晶が、特に注目を集めている。コレステリック液晶は、光の

波長程度の螺旋周期構造を自己組織的に形成するため、電子ペーパーやフォトニック結晶などの次世代の液晶光デバイス材料として、応用が期待されている。フォトニック結晶とは、異なる屈折率材料により作製された周期性構造体であり、周期性に起因する光のバンドギャップをもつ。フォトニックバンド

ギャップは高効率な光導波路や光共振器を実現可能とするため、光集積回路や低閾値レーザーなどへの応用が期待されている。コレステリック液晶をフォトニック結晶として用いる利点は、作製が極めて簡便、大面積化が容易、欠陥が少ない、温度や電場への敏感な応答などが挙げられる。温度や電場によって、周期構造にこれほど大きな変化を容易に実現できるのは有機材料ならではの魅力である。しかし、コレステリック液晶は作製が容易な反面、構造が一次元なので多次元フォトニック結晶に比べて光共振器としてのQ値が低いという欠点がある。そのため、コレステリック液晶をフォトニック結晶レーザーとしての応用を考えると、Q値の高い共振器構造の設計および開発が不可欠となっている。

2. 研究の目的

研究代表者は、これまでコレステリック液晶光共振器のQ値改善のため様々なデバイス構造を提案してきた。例えば、誘電体多層膜でコレステリック液晶を挟み込み二重の共振器構造を設けることで、従来より1桁高いQ値の共振モードが実現できることなど報告されている。また、コレステリック液晶を高分子化し、積層することでも光閉じ込めが強くなることも明らかとした。

本研究では、一次元フォトニック結晶であるコレステリック液晶の螺旋周期構造をコアとした光ファイバ構造を提案している。通常、バルク中に発生した光は単純に広がるが、コア中に発生する光はコアに空間的に閉じ込められて導波する。そこで、本構造ではコアをコレステリック液晶とすることで、コア内に光を閉じ込めて共振モードを効率良く励振させるのが狙いである。これは言い換えれば、三次元的な空間閉じ込めをもつ一次元フォトニック結晶ともいうことができ、最も理想的な一次元フォトニック結晶構造となる。つまり、本課題の目的は、光ファイバコアの閉じ込めを利用した高効率な光共振器の開発である。これらを実証するために、光増強効果を理論的に求めるとともに実際にデバイスを作製し、コレステリック液晶レーザーの低閾値化を実験的に検証する。

3. 研究の方法

(1) コレステリック液晶ファイバの作製

実験に使用したコレステリック液晶は、ネマチック液晶にカイラル剤を30wt%混合することによって得た。コレステリック液晶に石英中空ファイバを浸して、毛細管現象にてファイバのコア部に液晶を注入した。中空ファイバの内径と外径は、それぞれ50 $\mu\text{m}\phi$ 、363 $\mu\text{m}\phi$ である。なお、ファイバの内部表面に配向膜などはなく、中空ファイバには何も配向

処理は施していない。一方、比較のために通常の液晶セルも作製した。この液晶セルの厚さは25 μm であり、ガラスの表面にはポリイミド膜を製膜し、ラビング処理も行っている。

(2) ファイバ内の液晶配向の同定

ファイバとセルの反射スペクトル測定と顕微鏡観察から、中空ファイバ内でのコレステリック液晶の配向状態を調べた。顕微鏡観察では、まず、通常の落射照明での偏光顕微鏡観察を行った。次に、コレステリック液晶からの選択反射が生じない状態でのテクスチャ観察するため、外部照明を用いて顕微鏡観察した。一方、反射スペクトルは、CCDマルチチャンネル小型分光器を顕微鏡に取り付けて、コア部からのみの反射光を測定した。得られたコレステリック液晶ファイバの反射スペクトルに対して、既知であるコレステリック液晶セルのスペクトルと比較することで配向状態を推定した。

また、実験結果を検証するためにFDTD法を用いてコレステリック液晶ファイバ特有のテクスチャのパターンを解析した。

(3) コレステリック液晶ファイバからのレーザー発振の観測

コレステリック液晶レーザー発振の実験を行い、従来の液晶セル構造との閾値の違いについて検討した。レーザー色素を添加したコレステリック液晶を準備し、それを石英中空ファイバおよび液晶セルに注入した。サンプルを光励起するためにQスイッチNd:YAGレーザーの第2高調波532 nm、パルス幅8 ns、周波数10 Hzのパルス光を照射した。なお、励起光はレンズ($f = 100 \text{ mm}$)を用いて集光させ、その焦点距離の位置で励起光が照射されるよう設置した。発光スペクトルは波長分解能が0.5 nmのCCDマルチチャンネル分光器で測定した。

4. 研究成果

図1にコレステリック液晶を注入した中空ファイバの写真を示す。ファイバ全体が色付いており、温度によって色が変化することが確認された。また、目視による観察では、ファイバの色の角度依存は見られなかった。温度上昇に伴う赤から青への変化は、コレステリック液晶の螺旋ピッチの変化に対応しており、また、相転移点よりも高い温度で透明になったことより、これらの色は螺旋構造によって生じていることが分かった。

ファイバとセルの反射スペクトルの温度依存性を図2に示す。2つの反射波長のバンド幅と中心波長の温度依存はよく一致した。この実験結果もファイバの色の起源がコレステリック液晶の選択反射であることを示している。また、選択反射のファイバの方向

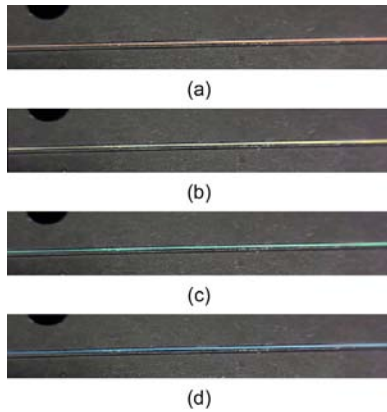


図 1. コレステリック液晶ファイバの外観 (a) 22°C, (b) 24°C, (b) 30°C, (d) 40°C

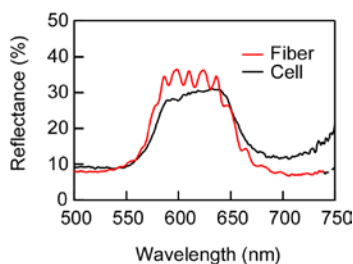


図 2. コレステリック液晶ファイバおよびコレステリック液晶セルの反射スペクトル

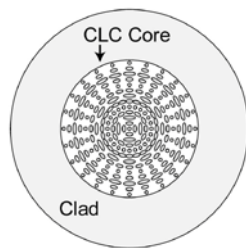


図 3. コレステリック液晶ファイバの配向分布

依存性は見られなかった。これらの結果から、図 3 のようにコアの中で螺旋軸が放射状となるような配向状態を持っていることが示唆された。ファイバ内のコレステリック液晶が図 3 に示すような配向状態になるとすれば、本来は 1 次元周期パターンしか持たないコレステリック液晶が、中空ファイバの中では擬 2 次元的なパターンを持つことになる。

そこで、中空ファイバ内でのコレステリック液晶の配向を確認するため、偏光顕微鏡観察を行った。図 4 (b) のように偏光顕微鏡に備え付けの落射照明での反射像は選択反射に起因する色が観測されたが、図 4 (d) のように外部光源を用いると、これまで観測したことないカラーグラデーションを持つテクスチャが現れた。

これらのテクスチャの起源を探るために、

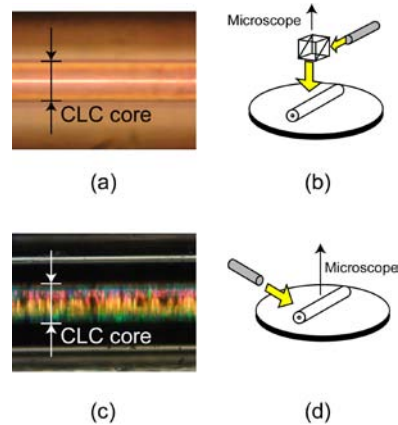


図 4. コレステリック液晶ファイバの偏光顕微鏡像 (a) 落射照明で得られた像, (b) 落射照明の光学系, (c) 外部照明によって得られた像, (d) 外部光源の光学系

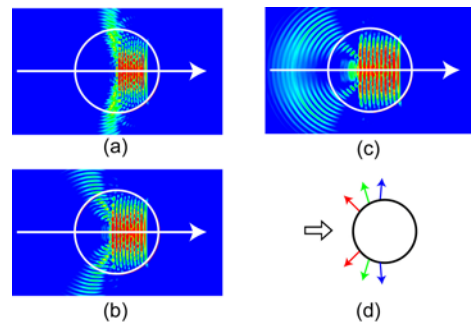


図 5. コレステリック液晶ファイバの FDTD シミュレーション (a) 450 nm, (b) 550 nm, (c) 650 nm, (d) 回折方向の波長依存

FDTD 法による光伝搬シミュレーションを行った。計算には、図 3 に示すような螺旋構造をもつ屈折率分布を考え、そこを伝搬する光の伝搬の様子を調べた。その結果を図 5 に示す。図中の白丸がコアに対応しており、矢印の方向に入ってくる光は、一部の光が上下方向に分かれることが明らかとなった。これは、FDTD シミュレーションより、擬 2 次元パターンによる回折現象であることが明らかとなった。つまり、波長によって回折される方向が異なるため、図 4 (c) のようなカラーグラデーションが現れることになる。回折方向の波長依存の解析結果と実験結果は良い一致を示し、更に、螺旋ピッチを変えた場合は、実験における温度を変えた場合の結果とよく一致した。

コレステリック液晶ファイバが擬 2 次元的な配向パターンをもつことが実験および FDTD シミュレーションから明らかとなったため、光励起によるコレステリック液晶ファイバからのレーザー発振実験を行った。図 6 にレーザー発振スペクトルの温度依存を示す。温度上昇によって発振波長がブルーシフトすることならびに、コア形状に依存するウ

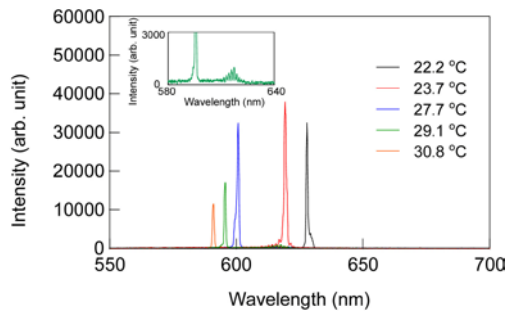


図 6. コレスティック液晶ファイバのレーザー発振の温度依存

イスパリングギャラリモードの観測などから、中空ファイバ内のコレスティック液晶によって光共振した光であることが確認された。また、螺旋周期構造による光閉じ込めはウィスパリングギャラリモードの閉じ込めより十分強いことも示唆された。現時点では、コア内のコレスティック液晶の配向に欠陥が多数存在しているが、レーザー発振の低閾値化に向けては欠陥の除去が最重要課題となる。これは界面の配向処理などを施すことで改善が期待される。

当初は、光ファイバのコアによる光閉じ込めとコレスティック液晶の光閉じ込めのカップリングを期待して研究を行ったが、実験では想定とは異なり、コレスティック液晶自体の配向が大きく変化する結果を得た。これらの成果は、本来 1 次元周期パターンしか持たないコレスティック液晶が、中空ファイバのような特殊な形状の中では 2 次元パターンの配向もとりうる重要な結果として学会で発表するとともに学術論文としてまとめ報告した。

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 2 件)

① R. Ozaki and H. Moritake, Wavelength and bandwidth tunable photonic stopband of ferroelectric liquid crystals, *Opt. Express*, Vol. 20, No. 6, 2012, pp. 6191-6196. 査読有

DOI: 10.1364/OE.20.006191

② R. Ozaki, N. Uno, and H. Moritake, Quasi-Two-Dimensional Optical Confinement in a Cholesteric Liquid Crystal Infiltrated Optical Fiber, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 50, 2011, pp. 111601-1 - 111601-7. 査読有

DOI: 10.1143/JJAP.50.111601

[学会発表] (計 4 件)

① 尾崎 良太郎, 森武 洋, 中空ファイバ内のコレスティック液晶の選択反射特性, 2011 年日本液晶学会討論会, 東京都市大学 (東京都), 2011 年 9 月 13 日

② 尾崎 良太郎, 森武 洋, 同心円状に配向したコレスティック液晶の光学特性, 2011 年秋季 第 72 回応用物理学会学術講演会, 山形大学 (山形県), 2011 年 8 月 31 日

③ 尾崎 良太郎, 森武 洋, 中空ファイバ内でのコレスティック液晶の配向, 2011 年春季 第 58 回 応用物理学関係連合講演会, 神奈川工科大学 (神奈川県), 2011 年 3 月 25 日

④ R. Ozaki and H. Moritake, Observation of cholesteric liquid crystal orientation in a holey fiber, Sixth International Conference on Molecular Electronics and Bioelectronics, Sendai International Conference Center, March 16, 2011

6. 研究組織

(1) 研究代表者

尾崎 良太郎 (OZAKI RYOTARO)
防衛大学校・電気情報学群・助教
研究者番号: 90535361

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし