

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：16301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25790042

研究課題名(和文) 強誘電性液晶を用いた波長-バンド幅可変光学フィルタの開発

研究課題名(英文) Development of wavelength tunable optical filter with independently variable bandwidth using a ferroelectric liquid crystals

研究代表者

尾崎 良太郎(Ozaki, Ryotaro)

愛媛大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：90535361

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：光の波長程度の螺旋周期構造を有する強誘電性液晶のフルピッチバンドの特性を利用して、波長およびバンド幅が独立して制御可能な光学フィルタに関する研究を行った。連続体理論による配向解析と光学計算により、電圧印加による螺旋構造の制御によって波長とバンド幅を独立に制御することが可能であることを見出した。実際に素子を作製し、実験を行い、デバイスの光学特性を検討した。

研究成果の概要(英文)：The chiral smectic C phase of ferroelectric liquid crystals has a self-assembling helical structure which is regarded as a one-dimensional pseudo-photon crystal. It is well known that a stop band of a ferroelectric liquid crystal can be tuned in wavelength domain by changing temperature or electric field. We have investigated the wavelength tunable optical filter with independently variable bandwidth using a full pitch band of ferroelectric liquid crystals. Electric field dependence of the ferroelectric liquid crystal director profiles is calculated by continuum theory, and then the optical properties of the full pitch band are calculated by the 4x4 matrix method. The results indicate that the bandwidth and wavelength can be independently controlled by varying incident angle, and electric field. We also experimentally investigated the transmission properties of the full pitch band.

研究分野：工学

キーワード：液晶 強誘電性液晶 フォトニック結晶 光学フィルタ バンド幅可変

1. 研究開始当初の背景

フォトニック結晶は、異なる屈折率材料により作製されたナノスケールの周期性構造体であり、その周期性に起因する光のバンドギャップをもつ。特異な波長-周波数分散関係により、フォトニック結晶は、光閉じ込め、スーパープリズム、負の屈折、スローライトなど興味深い光学特性を有しており世界的に開発が競われている。

一方、液晶はディスプレイの代名詞となっているが、ある種の液晶は、液体でありながらナノ周期構造を有しており、フォトニック結晶として機能する。液晶フォトニック結晶では、液晶分子が自発的にナノ周期構造を形成するため、高度なナノスケール微細加工が不要となり、作製面での大きな利点がある。更に、有機材料ならではの柔軟性を活かしたチューナブルフォトニック結晶としても期待されており、液晶の分野では、ディスプレイに代わる新たな応用として、液晶フォトニック結晶が期待されている。

しかし、液晶フォトニック結晶は作製が容易な反面、シリコンフォトニック結晶に比べ屈折率差が小さいという欠点がある。そのため、分子設計、積層化、無機材料とのハイブリッド化などによる特性改善の研究が広く行われている。しかし、未だ、従来の無機フォトニック結晶に匹敵するほどの高い光の閉じ込め効率は得られてない。また、無機フォトニック結晶とのハイブリッド化では、せっかくの自組織性による作製の簡便さが完全には活かしきれない側面がある。したがって、シリコン系の無機材料によるフォトニック結晶とでは実現できず、柔らかい有機の液晶系材料だからこそ実現できる機能を見出すことが重要な課題となっている。

本研究代表者は、強誘電性液晶の螺旋周期構造を利用することで、波長とバンド幅を同時に制御可能なストップバンドが実現できることを発見した。フォトニック結晶の研究において、波長とバンド幅を同時に制御する方法は、知る限りにおいて報告例がなく、これは、無機フォトニック結晶や、従来のコレステリック系の液晶では実現できない特性であった。本研究はこれまでの研究では温度制御であった系を、更に発展させ、電圧制御とすることを目的に開始したものである。

2. 研究の目的

本研究では、電圧印加によって、強誘電性液晶のストップバンドの波長とバンド幅を独立して制御することを目指すとともに、光学特性を明らかにすることを目的としている。主に下記の二点が検討事項である。

(1) 波長 - バンド幅可変ストップバンドの温度制御から電場制御への発展

強誘電性液晶の螺旋ピッチは温度や電場によって伸長させることは可能である。しかし、温度変化に対しては単調にピッチが伸び

るのに対して、電場印加では螺旋が歪みながら伸びていく。この変化が光学特性に及ぼす影響を実験により検討する。

(2) 実験と解析の両面からの波長-バンド幅可変ストップバンドの発現機構と光学特性の解明

波長とバンド幅の独立制御のメカニズムを端的に述べると、波長は螺旋ピッチ長によって制御され、バンド幅は入射角によって制御される。しかし、発現機構と偏光特性に関して未解明な部分もある。これらの検討事項に対して、液晶分子の配向分布解析および電磁界解析を行い強誘電性液晶の内部で生じている現象を理論面からも詳しく調べる。

3. 研究の方法

(1) 電場による螺旋構造の変化の観測

強誘電性液晶の螺旋軸が基板に垂直になるよう配向処理を施したガラスセルで実験を行った。セル内部のガラス表面に作製した電極間隔 100 μm の楕型電極に 500 V までの電圧を印加した。透過スペクトルは、偏光顕微鏡に取り付けた分光器にて測定した。強誘電性液晶は、温度により選択反射波長が変化するため、測定試料は顕微鏡用ホットステージで温度を一定に保った。

(2) 螺旋構造の理論解析

液晶の連続体理論により強誘電性液晶の配向計算を行い、電場印加による構造の伸長および変歪を調べた。さらに、それらの透過特性を調べるため、配向計算により得られた屈折率分布を 4x4 マトリクス法に組み込み、透過スペクトルの理論値を得た。

(3) 波長およびバンド幅の制御

垂直配向させた強誘電性液晶セルの両面に正三角形プリズムを取り付けて、高角度入射時の透過スペクトルを測定した。バンド幅制御の実験では、顕微鏡を用いず透過スペクトルを測定した。電極間距離 100 μm の微小領域のみの透過光を調べることが困難であったため、レンズを組み合わせることで、微小領域の光学特性を調べた。

4. 研究成果

(1) 透過スペクトルの電場依存

強誘電性液晶は電場で螺旋ピッチを制御することができるが、電圧印加による螺旋ピッチの伸長は、螺旋の変歪も誘起する。そこでまず、透過スペクトルの観測により、螺旋構造の伸長と変歪の程度を調べた。電圧は、直流と交流矩形波、交流正弦波、交流三角波を印加した。印加電圧の波形および周波数によって試料の透過スペクトルが変化した。網羅的に電圧を変えて測定を行った結果、数十 Hz 程度の交流三角波がストップバンドのディップを維持したまま長波長側へシフトすることがわかった。

強誘電性液晶の螺旋を長く伸長させるために適切な印加電圧があることが示されたが、それらの結果が理論的に正しいものであるかということを確認するために、連続体理論を用いて強誘電性液晶の配向計算を行った(図1)。得られた配向分布を屈折率分布に変換し、それを4x4マトリクス法に組み込むことで、強誘電性液晶の透過スペクトルを計算した。実験結果と計算結果において、螺旋が完全にほどける閾値電場で電圧を規格化したものを比較すると、ストップバンドの波長シフトは非常に良い一致を示した(図2)。しかしながら、現時点において、実験系が最適化されていないためか、閾値に近い、比較的高い電圧において、実験結果のストップバンドの歪みが大きくなっている。今後も、セル構造、電極形状、電圧波形および周波数の最適化に取り組み、高い電圧においても理論値に近いスペクトルが得られるように取り組んでいく。

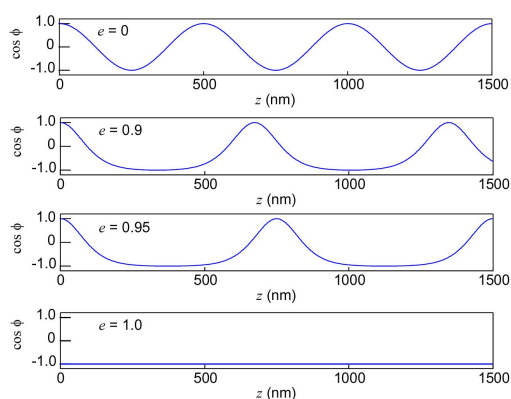


図1：強誘電性液晶の螺旋構造の電圧依存

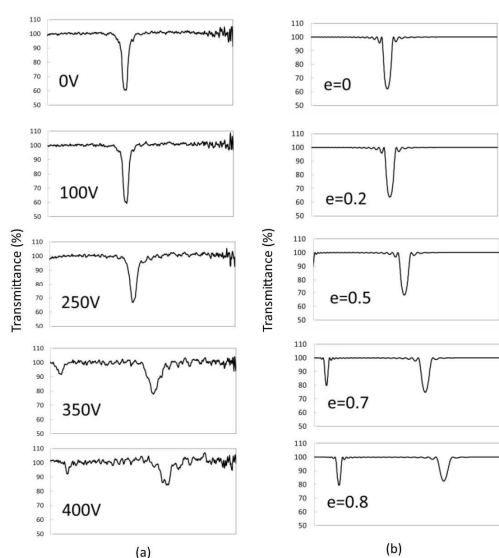


図2：強誘電性液晶の透過スペクトルの電圧依存 (a) 測定値, (b) 計算値

(2) 波長およびバンド幅制御

研究成果(1)において、理論計算との比較により、強誘電性液晶の螺旋構造の電圧制御できていることが明らかとなった。前述の試験では、顕微鏡下で微小領域のみを観察した。一方、バンド幅制御は、斜入射が必要となるため、顕微鏡を用いることができず、実験の難易度が格段に上がる。そこで、バンド幅制御の実験に先立ち、配向計算と光学計算により、波長およびバンド幅の制御がどの程度可能であるかをシミュレーションした。

シミュレーション結果から、予期していなかった透過スペクトルの偏光特性が現れることが明らかとなった。温度で螺旋構造を伸縮させる際は、透過スペクトルに偏光特性は現れないが、電圧による伸長の場合は、P偏光とS偏光でスペクトルプロファイルが変わった。これは、温度制御の場合は、熱エネルギー的に安定なので、常に正弦関数状の螺旋構造をとるが、電圧印加時は、熱的には安定ではないため螺旋の伸長に伴い、変歪も誘起されるためである。電圧印加時、S偏光入射時のストップバンドは高角入射になるとバンドが大きく歪むため光学フィルタ应用到当ではない。しかし、幸いにもP偏光のスペクトルは、高角入射時においても大きな歪みは現れなかった。そのため、フィルタ应用にはP偏光が適していることが明らかとなった。

また、温度制御と異なり、電圧制御では螺旋が完全にほどける閾値電圧が存在するため、電圧制御では温度制御に比べて波長を調整できる範囲が限られる。そこで、配向計算と光学計算のシミュレーションにより、電圧制御による螺旋の伸長でも、波長およびバンド幅可変の光学フィルタが実現できるか調べた。計算結果は、電圧制御でも十分にバンド幅と波長を制御できることを明らかにした。

理論計算により、本研究で提案した系は、P偏光に対して、波長およびバンド幅を独立して制御できる可変フィルタが実現可能であることが明らかになった。現在も、バンド幅制御のための斜入射実験を行っている。高い電圧における高角入射の透過特性が理論値ほどの結果を得られていないため、セル構成、電極形状、印加電圧波形などの最適化を図っている。今後も、強誘電性液晶を利用した新たな光学素子応用として、波長-バンド幅可変フィルタの実証を目指し研究を継続させる予定である。

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1件)

Ryotaro Ozaki, Kazunori Kadowaki, Hiroshi Moritake, Optical properties of broad stopband of a chiral smectic

liquid crystal at highly oblique incidence, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, Vol. 53 (2014) No. 1S, 01AE01
doi:10.7567/JJAP.53.01AE01

[学会発表](計4件)

R. Ozaki, K. Matsuura, K. Kihara, K. Kadowaki, Q. T. Duong, and H. Moritake, Bandwidth control of full pitch band in a chiral smectic liquid crystal by varying incident angle, temperature, and electric field, 15th International Conference on Ferroelectric Liquid Crystals, Prague, Czech Republic, June 28 - July 3, 2015

Ryotaro Ozaki, Kohki Matsuura, Kengo Kihara, Kazunori Kadowaki, Quoc Toan Duong, and Hiroshi Moritake, Bandwidth control of full pitch band in chiral smectic liquid crystal under oblique incidence, 6th International Conference on Electrical and Electronic Material Engineering, Shin-osaka brick building (Osaka, Yodogawa-ku) May 16, 2015.

尾崎 良太郎, 木原 健吾, 門脇 一則, 森武 洋, 入射角と印加電圧による強誘電性液晶のストップバンド幅の制御, 2014年日本液晶学会討論会, くにびきメッセ(島根県・松江市), 2014年9月9日

尾崎 良太郎, 液晶フォトニック結晶のストップバンドの広帯域化・多帯域化, 第4回光電子材料科学における現状と展望講演会, 香川大学(香川県・高松市), 2013年7月12日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

尾崎 良太郎 (OZAKI RYOTARO)

愛媛大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 90535361