

螺旋周期構造を利用した液晶レーザー



尾崎 雅 則*, 吉 野 勝 美**

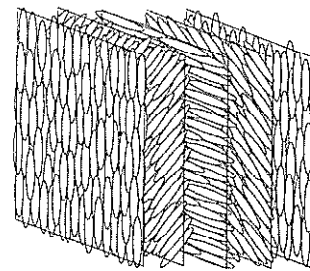
Liquid crystalline lasers based on periodic helical structure

Key Words : liquid crystal, laser, photonic band gap, stop band, cholesteric liquid crystals

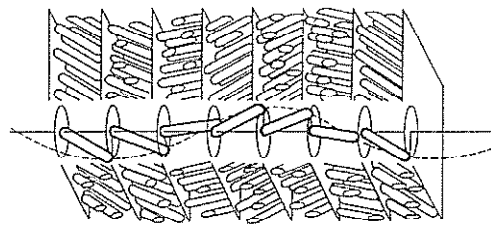
1. はじめに

光の波長程度の周期で三次元的に誘電率の異なる物質では、光の存在が許されないいわゆるフォトリソニックバンドギャップが存在する可能性があり、このような物質をフォトリソニック結晶と呼ぶことがある^{1,2)}。つまり、光が自身の波長と同程度の周期構造を感じると、いわゆるブラッグ反射を受け、それが三次元的にあらゆる方向で起これば光は進めなくなってしまう。このことは、電子が結晶内を進むときに、その原子の周期性を感じて電子の存在が許されないエネルギーバンドが生じるのと同様の現象で、この電子のバンド構造を利用することによりダイオードやトランジスタ、レーザーが作られることを考えると、光を自在に制御できる全く画期的なデバイスができるのではないかと期待できる^{3,4)}。

このように三次元的な周期構造でなくても、一次元的に屈折率が周期的に変化するような媒質でも面



(a)



(b)

図1 (a)コレステリック液晶、(b)カイラルスメクチック液晶(強誘電性液晶)の分子配列



*Masanori OZAKI
1960年2月生
大阪大学大学院・工学研究科・電気工学専攻・博士後期課程修了
現在、大阪大学大学院・工学研究科・電子工学専攻、助教授、工学博士、有機エレクトロニクス
TEL 06-6879-7758
FAX 06-6879-7774
E-Mail ozaki@ele.eng.osaka-u.ac.jp



**Katsumi YOSHINO
1941年12月生
大阪大学大学院・工学研究科・電気工学専攻・博士課程修了
現在、大阪大学大学院・工学研究科・電子工学専攻、教授、工学博士、電子物性工学、有機エレクトロニクス
TEL 06-6879-7757
FAX 06-6877-3542
E-Mail yoshino@elel.eng.osaka-u.ac.jp

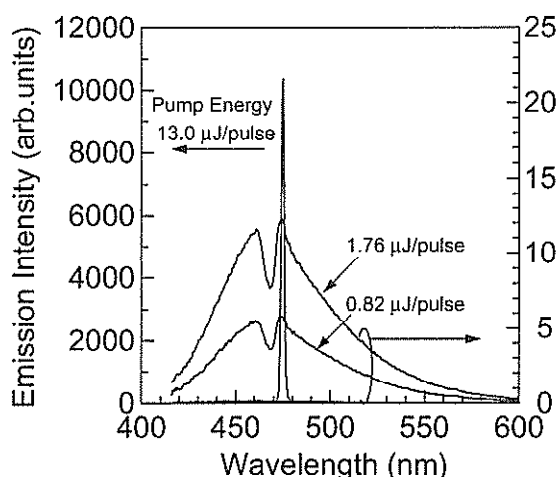
白い現象が見られる。例えば、DFBレーザーなどがそのよい例である。このような周期構造は、一般にはフォトリソグラフィなどの手法を用いた微細加工によって作られることが多いが、自然界には自発的にこのような周期構造を形作る場合が多くある。例えば、温度計などに使われるコレステリック液晶は、図1のように棒状の液晶分子が光の波長程度のピッチで捻れた螺旋構造を形成している。この螺旋構造は、液晶分子内の不斉炭素に由来するもので、螺旋構造内に光が入射すると、その螺旋周期(ピッチ)に対応した波長の光で螺旋の捻れ方向と同じ方向に回転する円偏光成分が選択的に反射される。この現象は選択反射と呼ばれ、一般にコレステリック液晶の螺旋周期は温度によって変化するため、反射

される光の波長すなわち色が温度とともに変化する温度計となる。また、この選択反射は、一次元フォトニックバンド構造によるストップバンドと考えることができる。このような螺旋構造は、例えば、カナブンや玉虫などの昆虫にも見られ、この周期構造による光の反射によってカナブンや玉虫が色鮮やかに見える。

液晶は、コレステリック液晶以外にも螺旋構造を形成することがあり、この一次元螺旋構造を一次元フォトニックバンド構造と考えてオプトエレクトロニクスに積極的に利用しようとする研究が近年盛んになってきた。ここでは、その一つとして筆者等のやっている液晶レーザーの研究を紹介する。

2. 強誘電性液晶レーザー

図1(b)は不斉炭素を含んだ液晶分子がスメクチックC相(分子が層状に並んで、かつ分子が層の法線から傾いた状態)を取るときに形成される螺旋構造を示している。このカイラルスメクチック液晶は、自発分極を持つことがあり強誘電性液晶と呼ばれ、従来のネマチック液晶をベースにした表示素子に比べて三桁ほど高速に電界に対して応答することからディスプレイをはじめ様々なオプトエレクトロニクスへの応用が検討されてきた。この強誘電性液晶の螺旋周期は一般には数ミクロン程度であるが、不斉炭素周りの分子設計を行うことにより、数百nm以下の螺旋周期を持つ材料も作ることが可能であり、このような強誘電性液晶もコレステリック液晶と同

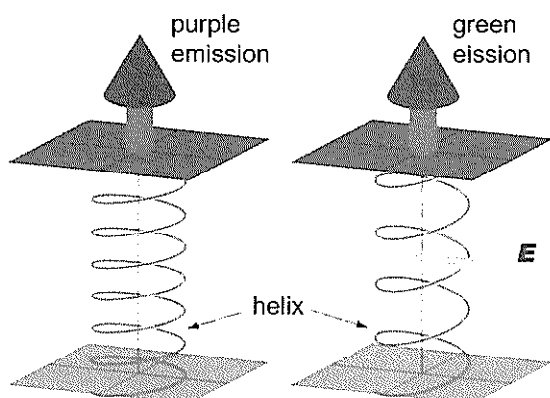


(a)

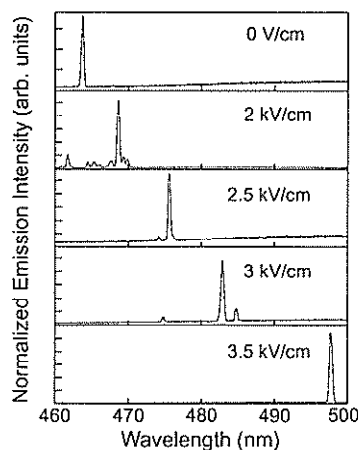


(b)

図2 (a)色素を添加した強誘電性液晶の発光スペクトル (b)強誘電性液晶がレーザー発振している様子



(a)



(b)

図3 (a)電界により強誘電性液晶の螺旋周期が変化する模式図 (b)電界印加によるレーザー発振スペクトルのシフトの様子

様にストップバンドを持つ。例えば、螺旋軸がガラス基板に垂直に並んだ強誘電性液晶の透過光スペクトルには、螺旋周期に対応した波長の光が反射されるために透過光量にディップ(ストップバンド)が観測され、その波長は温度とともにシフトする。

この強誘電性液晶にレーザー色素を僅かに添加して、それに紫外線レーザーを照射してやると、励起光強度が弱い場合には図2(a)のように蛍光スペクトル内にストップバンドに対応したディップが観測される。さらに励起光強度を強くしてやると、最終的にストップバンドの端からレーザー発振が起こる。図2(b)はレーザー発振している様子を示したもので、特別な光学系やアライメントを行わなくとも、簡単にレーザー発振する⁵⁾。このレーザー発振はストップバンドの端で光の群速度が低下し、光の局在化が起こることによるものであると考えられる。

このレーザー発振は、前述のように温度を変えることによってその発振波長を変えることもできるが、強誘電性液晶は自発分極を有していることから電界によってその螺旋構造を容易に歪ませるあるいは消失させることが可能であり、発振波長の電界制御が期待できる。また、この電界による螺旋構造の変歪は、数マイクロ秒程度の高速度現象である。一般に、螺旋軸に垂直方向に電界を印加すると、図3(a)のように螺旋周期が伸びる。従って、このことから電界によりレーザー発振波長を制御できることが分かる。図3(b)は、図2でレーザー発振している色素添加強誘電性液晶に電界を印加した場合の発光スペクトルである。僅かな電界の印加であるが、レーザー発振波長が電界とともに大幅にシフトしている。もちろん、発振自体をon, offする事も可能であり、Qスイッチやモードロックへの応用の可能性もある。

このレーザー発振を有効に行うためには、光をさらに有効に閉じ込め、かつ励起が有効に起こる素子構成にすることが重要であり、そのために導波路構造が適している。図4は強誘電性液晶をその螺旋軸がガラス基板に平行になるように並べた素子を、螺旋軸に垂直方向から直線状に光励起する導波路レーザーの模式図であり、この構造でもレーザー発振が確認できた。この場合、液晶層の厚さを数ミクロン～数十ミクロン程度にすることにより厚さ方向にも閉じ込めが起こり、また、導波路をチャンネル化する事により三次元的に閉じ込めることも可能となる。また、図2の素子では螺旋軸にほぼ沿って励起光を入

射しているが、この場合、素子長(作用長)を延ばしても励起光が吸収により中まで入らず有効な光励起ができないのに対して、図4の素子では、作用長を延ばしても有効に励起することができる。

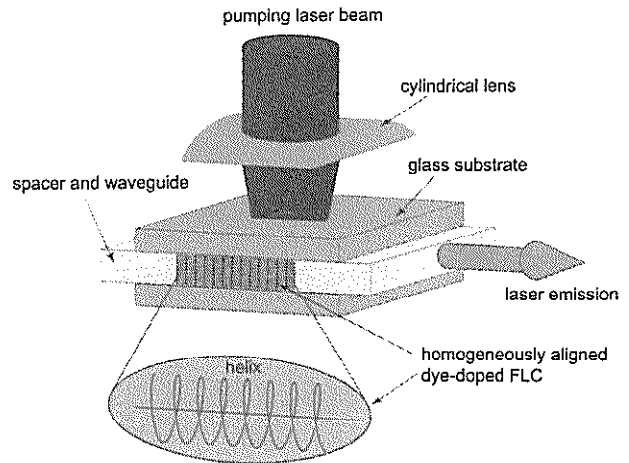


図4 強誘電性液晶導波路レーザーの素子構成

3. 高分子コレステリック液晶レーザー

コレステリック液晶は、温度計として用いられることから分かるように、螺旋周期が温度に強く依存する。その結果、レーザー発振波長が僅かな温度変化によってシフトしてしまう。もちろん、不斉炭素の分子設計等により温度依存性を極力抑えた液晶も作ることが可能であるが、我々は、高分子化することによりその問題点を解決した。すなわち、光重合基を有するコレステリック液晶を螺旋構造に並べたのちに光重合すると、螺旋構造を保ったまま高分子化することができる。この高分子化により螺旋周期が温度にほとんど依存しなくなりレーザー発振波長を極めて安定させることが可能となった。

また、この高分子化によるもう一つのメリットは、フレキシブルなフリースタANDINGフィルムが得られることである。図5(a)はそのフィルムを曲げた状態で励起光を当てたところである。フィルムを曲げた状態でもレーザー発振しており、この状態でも螺旋周期構造が保持されていることが分かる。また、このフィルム状高分子コレステリック液晶は、線状あるいは面状に励起することにより線状、面状に発光させることも可能であり、図5(b)に示すように曲げたフィルムを線状に励起した場合、フィルム上の各点からのレーザー光を一点に集光させるこ

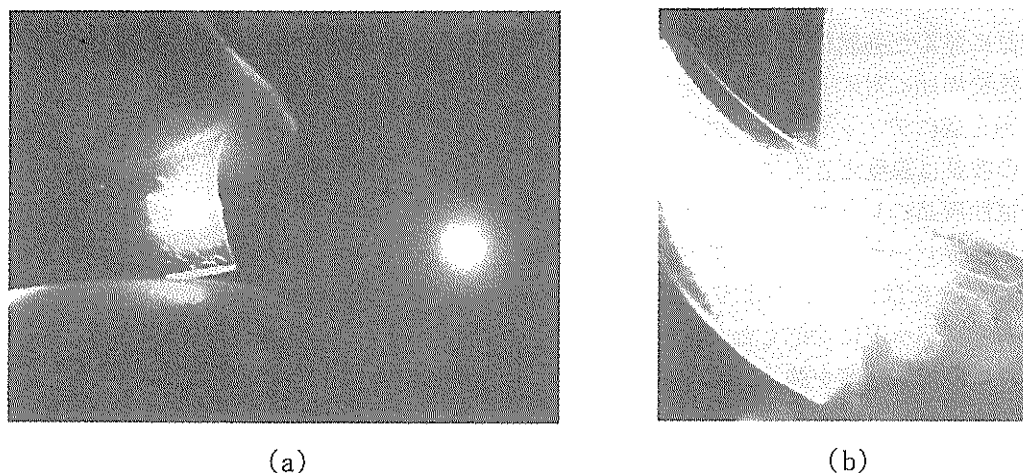


図5 (a)高分子化コレステリック液晶フィルムのレーザー発振の様子,
(b)曲げられたフィルムによるレーザービームのフォーカスの様子

とができる。このことは、フレキシブル集光レーザーが実現されていることを示している。

さらに、高分子化する前にフィルム面内で温度勾配を付けることによりフィルム面内で螺旋周期に分布を持ったフィルムを作ることも可能であり、これを面状に励起してやれば、場所によって波長の異なった多波長のレーザー発振が観測されることになる。

4. 終わりに

現在液晶はディスプレイの代名詞と云っても過言ではないほど、我々の周りで使われている。しかし、ディスプレイとして使われているのは、液晶の持つ性質の中でも、光学的異方性や誘電異方性といったマクロな性質にとどまっている。液晶はナノスケールの分子が自己組織化しており、細胞膜などの生態系がスメクチック液晶であることを考えると、液晶分子が本来持っているポテンシャルはもっと高いものであると期待できる。本稿でも取り上げたように、液晶はナノスケールの周期構造を自己組織的に作り出し、中には三次元的なナノ周期構造を発現するものもあり、究極のナノテクノロジーとも言えるかもしれない。おまけに、液晶は外場に対しても極めて

敏感であり、今後、液晶をナノ構造体としてとらえ、光、電界、磁界との相互作用をうまく使ってやれば、画期的なナノデバイスが実現できるものと確信する。

最後に、レーザー用強誘電性液晶は、Darmstadt工科大学のHaase教授から、光重合性コレステリック液晶はMerck KGaAから提供して頂いたものであり、また、本原稿で紹介した実験は大学院生の松井龍之介、笠野真弘両君とともに行ったものであることを付記する。

参 考 文 献

- 1) S. John, Phys. Rev. Lett., 58, 2486(1987).
- 2) E. Yablonovitch, Phys. Rev. Lett., 58, 2059(1987).
- 3) K. Yoshino, K. Tada, M. Ozaki, A. A. Zakhidov, R.H. Baughman, Jpn. J. App. Phys., 36, L714(1997).
- 4) K. Yoshino, S.B. Lee, S. Tatsuhara, Y. Kawagishi, M. Ozaki, A. A. Zakhidov, Appl. Phys. Lett., 73, 3506(1998).
- 5) M. Ozaki, M. Kasano, D. Ganzke, W. Haase, K. Yoshino, Adv. Mater., 14, 306(2002).

