

氏名	よだ ひでひこ 依田 秀彦		
授与学位	博士(工学)		
学位授与年月日	平成11年3月25日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)電気・通信工学専攻		
学位論文題目	導波路インライン型液晶応用デバイスに関する研究		
指導教官	東北大学教授 川上彰二郎		
論文審査委員	主査 東北大学教授 川上彰二郎	東北大学教授 内田龍男	東北大学助教授 花泉修
	東北大学教授 米山務		

論文内容要旨

近年, インターネットや電子メールを中心に高度情報化の波が我々の生活に浸透してきている。高度情報化が今後とも発展していくためには, 情報伝送の大容量化・高速化とそれに伴う光デバイスの高性能化・多機能化が不可欠である。

光デバイスを高性能化するのには, 光導波路(光ファイバも含む)に光素子を挿入(インライン)する構造とする方法が有効である。その代表的な方法として, (i)光素子を光導波路に集積する光集積回路や, (ii)光素子を光ファイバにハイブリッド集積する光ファイバ直接集積化構造などがあげられる。また, 光デバイスを多機能化するための材料としては液晶が魅力的である。液晶は光学的・電氣的に異方性をもつ材料であり, その屈折率異方性は従来の光学材料のそれと比べて大きい。そのため, 液晶を用いる光デバイスには高効率な光波制御を期待できる。以上の理由から, 導波路インライン型構造と液晶を組み合わせることによって, 高性能で多機能な光デバイスを実現できる可能性がある。

本研究は, 次に述べる2種類の導波路インライン型液晶応用デバイスに関する研究である。

- (1) 液晶可変波長フィルタ: 波長分割多重(Wavelength Division Multiplex: WDM)通信システムは大容量伝送の一形態であり, 可変波長フィルタはWDM通信システムのキーデバイスである。可変波長フィルタは, 波長の異なる複数の信号の中から特定の波長の信号を選択する用途に用いられる。本論文の可変波長フィルタは, 光ファイバ直接集積化構造への適用を念頭においている。
- (2) 液晶波長板(位相板): 波長板は, 光の偏波状態(state of polarization: SOP)を制御するために用いられる。本研究の波長板は, 導波路のTE波とTM波とを切り替えるのに用い, またポリマー導波路を用いた光集積回路への適用を念頭においている。

本研究の目的は, これら導波路インライン型液晶応用デバイスを設計し実現することにある。本論文の構成は以下の通りである。

第1章は, 緒言である。

第2章では, TN(Twisted Nematic)型液晶可変波長フィルタについて述べている。ネマティック液晶をTN配向構造として用いる可変波長フィルタは, 他の液晶可変波長フィルタと違って, 特別な工夫を要せずに共振波長(選択波長)を偏波無依存に決定できるメリットがある。共振波長が偏波無依存となる理由は, 高電圧印加時のTN配向分布の特殊性にある。TN型可変波長フィルタの構造を図1に示す。

次にTN型可変波長フィルタの共振波長の電圧特性を見積もるために, Jones行列を用いる動作解析を行った。この動作解析法は, 現実の材料定数および

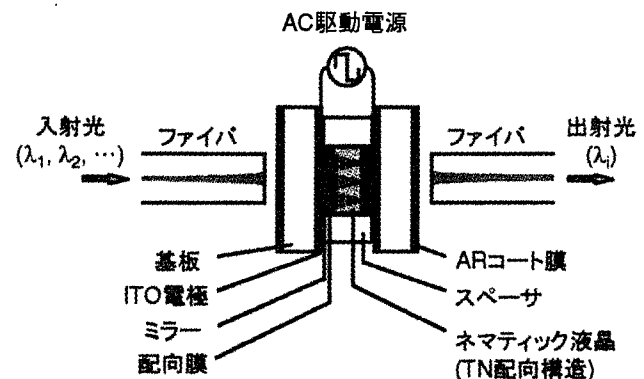


図1 TN型液晶可変波長フィルタの構造

配向分布を加味し、精度よく共振波長を計算できることが特徴である。この動作解析法に基づいて共振波長の電圧特性を計算した結果から、2通りの共振系列の共振波長が一致して変化する波長範囲（チューニングレンジ）を求めることができる。

もう一つの動作解析として、モード結合理論による動作解析を行った。この動作解析法では、現実の配向分布を簡単なモデルで表し、液晶の異常光と常光の結合モードとしてフィルタの固有モードを求め、それに付随して求まる関係式から共振波長を比較的簡単に計算できる。計算パラメータを変えて共振波長を計算する場合、Jones 行列による方法では複雑な計算に時間を要する反面、モード結合理論による方法では計算時間を要せずにおおまかな傾向を知るのに有効である。この動作解析法に基づいて共振波長の電圧特性を計算したところ、Jones 行列による動作解析から求めた共振波長の傾向をうまく再現することが可能であることがわかった。

実際に TN 型液晶可変波長フィルタを作製し、特性を評価した。フィルタに平行光線を入射し、出射光の透過スペクトルを測定したところ、挿入損失が 1.5dB、フィネスが 9.4 の結果を得た。また共振波長の電圧特性を測定したところ、チューニングレンジが 14nm、共振波長の偏波依存性が 3nm の結果を得た。（ただし偏波依存性は測定誤差であり本質的なものでない）。

第 3 章では、ポリマー導波路集積型液晶波長板の動作原理および設計方針について述べている。ポリマー導波路は、他の導波路に比べて機能面でのフレキシビリティが広い（例えば、導波路の内部や上部に電極を設け、同時に EO 物質を埋め込んでおくことによってスイッチング機能をもたせうる）といった特徴をもつ。この特徴を活かした要素技術のひとつとして、ポリマー導波路に液晶波長板を複合集積して光波制御する応用が考えられる。

液晶波長板の構造を図 2 に示す。導波路内部に空洞を形成し、空洞に誘電率異方性が正のネマティック液晶を封入した構造である（同図(a)）。液晶層の上下に形成した 4 つの電極に適切な電圧を印加すると液晶分子は電界ベクトルと平行に配向するため、液晶の光学軸が液晶波長板の方位となる（同図(b)）。波長板のリターデーション Γ は液晶の複屈折 Δn と空洞の(光の進行方向の)ギャップ d から決まり、 $\Gamma = (m + 0.5)\lambda$ (m は整数) のように選ぶ。

液晶波長板の動作原理を図 3 に示す。液晶波長板を用いた偏波制御は、印加電圧の比 $V_A : V_B$ を変え電界ベクトル E の方位 ϕ を制御することにより行う。 $\phi = 45^\circ$ のとき、入射した TE 波は液晶波長板を通過後 TM 波

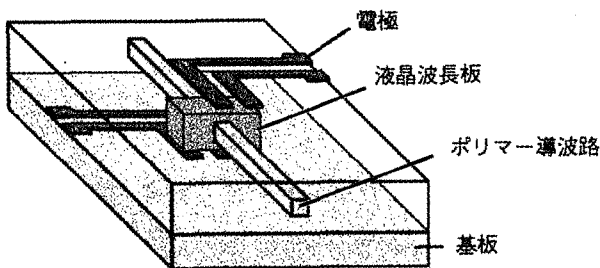


図 2(a) ポリマー導波路集積型液晶波長板の構造

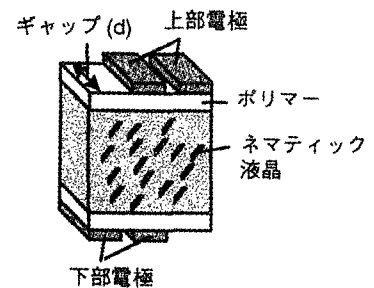


図 2(b) 液晶波長板の構造

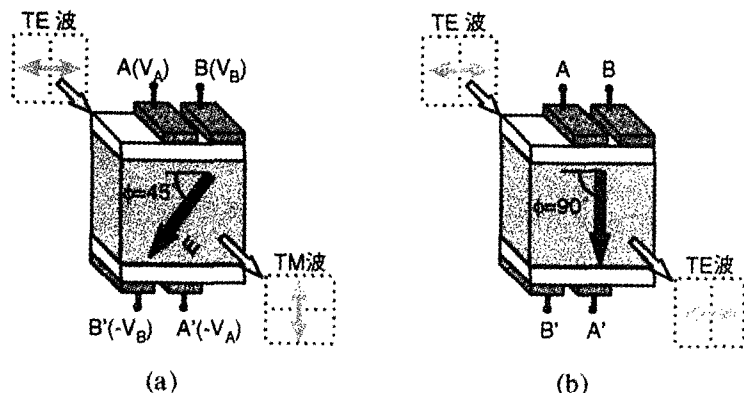


図 3 液晶波長板の動作原理

として出射する（同図(a)）。また $\phi=90^\circ$ のとき、偏波状態を保ちTE波のまま出射する（同図(b)）。

実際に液晶波長板を作製すると、液晶の材料定数を決めることが必要となる。液晶波長板に理想的な動作（図4）をさせるためには、電界ベクトル方位の制御および空洞のギャップの作製精度が重要であり、そのため今回の作製では、屈折率異方性 Δn の小さな液晶を選ぶことにする。

第4章では、ポリマー導波路集積型液晶波長板の作製および評価について述べている。液晶波長板の作製は、ポリマー導波路および液晶用空洞の作製に大別される。ポリマー導波路はPMMA（polymethylmethacrylate）系のシングルモード導波路であり、スピコート法と反応性イオンエッチング法を利用して作製できる。一方、ポリマー導波路内部へ空洞を作製するために、作製法を提案し、図4に示す作製法を確立した。この空洞作製技術の確立までには多くの困難を生じ、解決のために試行錯誤を重ね、多くの時間を費やすことになったが、その分多くの知見を蓄えることができた。本作製法の特長は、深さ30 μm 以上の溝にも有効なことである。

実際に液晶波長板を作製しその特性を評価した。まず波長板動作の確認のため、液晶波長板にTE波を入射したときの出射偏波を測定したところ、印加電圧を変えることによって出射偏波状態を制御でき、よって波長板として動作することを示すことができた。同時にこの測定結果から、現実のリターデーション $\Gamma=\alpha\Delta n \cdot d$ ($\alpha < 1$)を表すパラメータ α を $\alpha=0.8\sim 0.9$ と求めることができた。次に、液晶波長板の2つの動作状態（図3の(a)と(b))を切り替えるのに要する時間（応答時間） t を測定したところ、 t =数10～数100msecを得た。また印加電圧を高くすることによって、応答時間は短くなることも確認した。最後に、液晶波長板の挿入損失を測定し、最小値で3.2dB（理論値は1dB）を得た。

以上より、ポリマー導波路に液晶波長板を複合集積して光波制御することが可能であることを確認できた。同時に、波長板の $\Delta n \cdot d$ を微調整することの必要性が本実験から明らかになった。そのためには、例えば各電極を光の進行(z)方向に二分しz方向にも電界成分を発生させて、液晶分子をz方向に傾けxy面内の複屈折の大きさを調節することによって特性の改善が期待される。

第5章は、結言である。

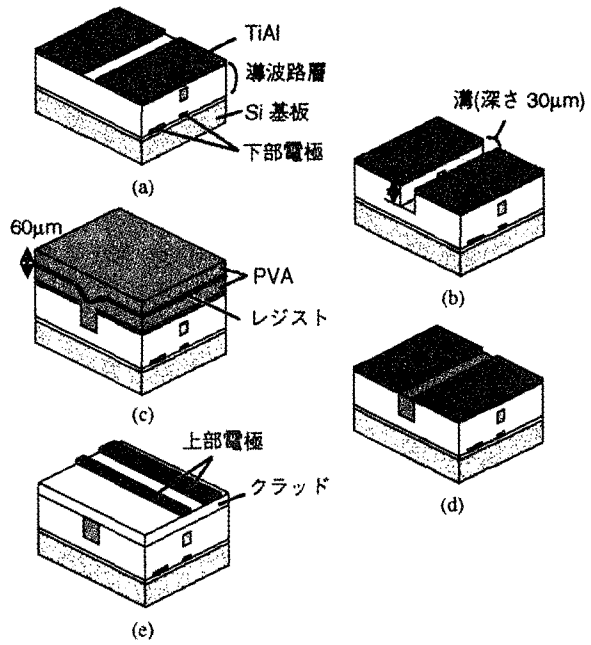


図4 液晶用空洞の作製方法

審査結果の要旨

光通信の波長選択素子や偏波制御素子は、それぞれ波長多重通信及びコヒーレント光通信や光センシングのシステム構築のためには必要不可欠であり、光ファイバや平面光回路との高い結合効率を達成することによって広い応用が期待されている。液晶は極めて大きな複屈折性を有するため薄型化に適しており、材料の選択によりマイクロ秒の応答も可能であるため、光ファイバや平面光回路に直接集積が容易な高機能デバイスの実現が可能である。本論文では、液晶を用いた可変波長フィルタ及び導波路インライン型偏波制御素子の考案・設計・試作とその評価に関する検討の結果をまとめたもので、全編5章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的が述べられている。

第2章では、液晶可変波長フィルタの動作解析と素子の作製・評価に関する結果について述べている。ファブリペロー共振器を液晶で満たし、配向を印加電圧で制御することにより共振波長を変化させるフィルタの動作をJones行列を用いた数値解析によって明らかにした。また、結合モード理論を用いて、共振波長を印加電圧の関数と見たときに跳躍が現れる低電圧域から、高電圧域にまで及ぶ見通しの良い解析を可能とした。さらに、実際に素子を作製し、共振波長の印加電圧特性が解析結果と良く一致することを実証した。

第3章では、ポリマー導波路への集積に適した波長板の設計について述べている。著者はポリマー導波路内部で、液晶分子を光の入射面に平行な面内で回転させる新しい構造を提案し、リターデーションの制御性の良い波長板を得るための最適な液晶材料の選定、液晶封入用の空洞の形状及び電極の配置に関する設計を行った。

第4章では、導波路インライン型液晶波長板の作製と評価の結果について述べている。ポリマー導波路中に液晶を封入するためには空洞を形成する必要があるが、従来技術では困難であった。著者は、水溶性であるポリビニルアルコールを材料系として利用した、ドライエッチングを主とする巧妙な加工プロセスを考案し、ポリマー導波路内部に液晶封入用の空洞を形成する技術を初めて確立した。さらに、実際に素子を作製し、波長板として動作することを実証した。これらは極めて有用な知見である。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、光通信ネットワーク用デバイスとしての実用化を目指して、液晶可変波長フィルタの動作解析・作製・評価、およびポリマー導波路に集積した液晶回転波長板の提案・試作・動作評価を行ったものであり、光集積工学および光通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。