

機関番号：21401  
 研究種目：基盤研究 (C)  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：20560330  
 研究課題名 (和文) コプレーナ導波路を用いた  
 液晶ハイブリッド化ミリ波制御デバイスに関する研究  
 研究課題名 (英文) Study on Liquid Crystal Hybrid Type of  
 Millimeter-wave Controlling Devices by Using Coplanar Waveguide  
 研究代表者  
 能勢 敏明 (NOSE TOSHIAKI)  
 秋田県立大学・システム科学技術学部・教授  
 研究者番号：00180745

## 研究成果の概要 (和文)：

平板型の優れた高周波導波路の中でも集積化に有利な電極構造を有するコプレーナ導波路 (CPW) に注目し、液晶ミリ波位相変調器を実現する試みを行った。CPW 基板の上にスペーサを介して適当な大きさの電極基板を積層する事により、通常の液晶デバイスと同じサンドイッチ型のセル構造を簡単に導入できるため、液晶を集積化した位相変調器が容易に実現できる事を実験的に示した。また、FDTD 解析によってその動作特性を詳しく調べると共に、上部電極構造、誘電体基板等の最適化により 50GHz 程度までの良好な位相変調特性が実現された。

## 研究成果の概要 (英文)：

Millimeter wave (MMW) liquid crystal phase shifter is investigated focusing on the advantage of integration easiness in the coplanar waveguide (CPW), which is well known as an excellent planar type of circuit for the super high frequency electro-magnetic waves. It is empirically confirmed that the liquid crystal (LC) material integration phase shifter can easily be obtained by introducing a sandwich cell structure which is commonly used in many LC device applications. After the optimization of upper electrode structure, dielectric substrate and so on, the phase shifting properties are improved up to about 50GHz.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：マイクロ波・ミリ波・液晶

## 1. 研究開始当初の背景

低電圧・低電力で大きな電気光学効果を示す優れた電気光学材料として知られている液晶材料は、平板型ディスプレイへの応用が目覚ましく進んでいる。ディスプレイ応用に

おいて、液晶は光の ON/OFF を低電圧・低電力で制御する光シャッターとして動作している。電圧印加時の分子配向状態の変化に起因する液晶材料の優れた可変特性は、可視光領域に限られた特殊な性質ではなく、広い

電磁波スペクトルの中で可視光以外の様々な周波数領域においても優れた制御デバイスとしての応用が期待できる性質である。

一方、情報通信技術発展の歴史を振り返って見ると、マイクロ波まで進んでいた高周波化の進歩が、半導体レーザーと光ファイバーの発明によって半世紀ほど前に光の領域まで一気にジャンプしてしまった。その結果、電磁波周波数スペクトルの中で電波と光の間に未開拓な領域が長い間残されていた。このミリ波・THz 波領域と呼ばれる電磁波領域は、最近の優れた光源および検出法の発明に端を発し、新しい応用の可能性の期待から大きな注目を浴びるようになってきた。

例えばミリ波帯に限っても、①超高速ワイヤレスネットワーク、②車載レーダー、③新しいセンシング法としての応用についての具体的な試みが始まっている。これらの超高周波帯では電波の直進性が強く現れるため、光のようにビーム状に絞った電波を用いて必要な相手と必要最低限の電力で通信を行うような、極めてエネルギー効率の高い使い方が可能になる。この性質は、通信時の情報セキュリティの点でも大変有用である。しかし一方で、外乱に影響されない安定な通信を確保する為には、ビームを正確にしかも高速に制御する何らかの制御デバイスが不可欠となる。このような要求は、最近益々重要となっている携帯端末ではより深刻である。

以上のような情報通信技術の時代背景および最近の要求を踏まえて、小型軽量で低電圧・低電力な制御デバイス応用が期待できる液晶材料に注目し、ミリ波帯における液晶制御デバイスを実現する取り組みを行っている。

## 2. 研究の目的

ミリ波帯のような光と電波の間に位置する電磁波領域において、何らかの制御デバイスを実現する方法として、大きく二つのアプローチが考えられる。①第一に准光学的手法と呼ばれる、光ビームのようにレンズやプリズムを用いて空間的に電波をとり回す手法が挙げられる。液晶を用いてこれらを実現する場合は、焦点可変液晶レンズや偏向角可変液晶プリズム等の実現を目指す事が考えられる。しかし、可視光に比べて桁違いに長い波長領域である事を考えると、桁違いに大きなレンズやプリズムが必要になり、このような巨大な3次元構造を持つ液晶デバイスを実現する為には、これまでに無い全く新しい素子構造や素子作製手法を開発しなくてはならない。

もう一つの方法は、②電子回路に液晶材料

を集積化する方法である。この場合には、波長の制限を受けないため非常に小型軽量に液晶材料を集積化して用いる事が可能になる。我々はこの点に注目して第二のアプローチによって液晶デバイス応用を試みている。

しかし一方で、例えば前述の偏光角可変液晶プリズムと同等な働きをするミリ波ビームステアリングデバイスを、後者の電子回路に組込む方法で実現しようとした場合、少なくとも位相変調器、アンテナアレイ、付随する駆動回路、パワーデバイダ等を同時に集積化する必要があり、一つの機能を発現するためのデバイス構成はかなり複雑になる。しかし、小型軽量化の点で有利になる事以外にも、平板上の部品構成を任意にアレンジして様々な機能デバイスに展開できる拡張性の点からも大変魅力的な手法である。

本研究では、最終的なミリ波ビームステアリングデバイス実現のキーとなる液晶ミリ波位相変調器を、平板状の電子回路に集積化する手法を用いて実現する事を目指している。

## 3. 研究の方法

高周波領域で集積化デバイスを形成するために良好な平板型回路が必要となるが、従来良く使われているマクロストリップ導波路 (MSL) の他に最近コプレーナ導波路 (CPW) と呼ばれる新しいタイプの導波路も注目されている。CPW 基板は、信号電極とグランド電極が一平面上にあり、基板上面にトランジスタ等の部品をマウントするだけで容易に集積化が行える特徴を有している。ここでは、適当な大きさのガラス基板を適当なスペーサを介して CPW 基板上にマウントするだけで通常の液晶セル構造を構成できるため、他の電子部品と同様に液晶材料も容易に集積化する事が可能になる点に注目した。

CPW をベースとして構成する液晶位相変調器の基本特性について、上部電極の影響、下部誘電体材料の影響等について詳しく調べ、素子構造の最適化を行った。特に、液晶セルを構成する上部ガラス基板上に設置する電極の形状を変化させ、共振特性を導入する事による特性改善の効果を詳しく検討した。

一方、CPW 基板上に形成するセル構造には、液体状の様々な物質を導入する事が可能である。したがって、ミリ波の透過・反射特性の変化を調べる事により、導入した物質のミリ波領域における屈折率や損失を調べる事が可能になる。これまで、導波管に液晶材料等を封入してその屈折率と損失を評価する方法が提案されているが、導波管内を十分に満たすためには多量の測定試料を必要とした。しかし、CPW 基板で構成されるセル構造では、通常の液晶セルと同様にわずかな試料があれば十分である。また、平板回路の場合

には導波管のようなカットオフ特性が無い  
ため、低周波帯から一気に測定が可能となる。  
これらの特徴を利用し、極めて少量のサンプ  
ルで測定が可能となると共に扱い易い測定  
方法としての可能性を検討する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 共振特性の導入による改善効果の検討

図1に示すように、CPW 基板の上部に適  
当な大きさの電極基板を積層してセル構造を  
形成する事により、液晶位相変調器が容易に  
形成できる。この場合、液晶駆動用の上部電  
極の効果により駆動電圧が大幅に低下する  
が、同時に損失も増えてしまう問題があっ  
た。したがって、位相変調の総量は大きくなる  
ものの、単位損失当たりの位相変調量で比べ  
ると必ずしも改善されている訳ではなかつ  
た。例えば、上部基板から電極を取り除きガ  
ラス基板のみでセル構造を構成した場合、  
駆動電圧が上がり位相変調量も小さくしま  
うが、電極による損失が大幅に低下するた  
め、単位損失当たりの性能指数(FOM)で評  
価した場合にはほとんど変わらない値が得  
られていた。

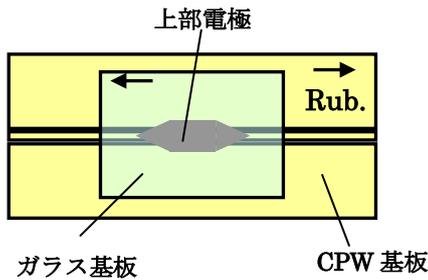


図1 CPW型位相変調器の構造

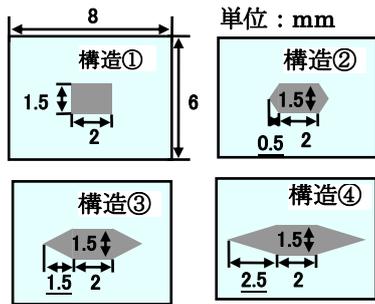


図2 上部電極の形状

そこで、図2に示すように上部電極の形状  
を調整し、共振効果を導入する事によって得  
られる位相変調特性の改善効果について検  
討した。ここでは、CPW 信号線路方向にと  
がった形状を有する六角形の電極形状を導入  
して伝搬特性の変化を調べている。

液晶の駆動電圧(10V, 20Hz)を ON/OFF する  
前後での位相変化を測定した結果を図3に  
示す。これまで用いてきた単純な長方形の電

極①では、周波数に対してほぼ直線的に位相  
が変化する様子が見られる。これは、電圧駆  
動によって一定の屈折率変化が生じた場合  
に予想される位相変調特性である。これに対  
して、②~④に示す六角形状を導入した電極  
の場合には、特定の周波数において位相の変  
化が大きくなる様子が見られる。すなわち、  
適当な周波数領域を選べば位相変調量を3  
倍程度まで拡大できる事が分かった。

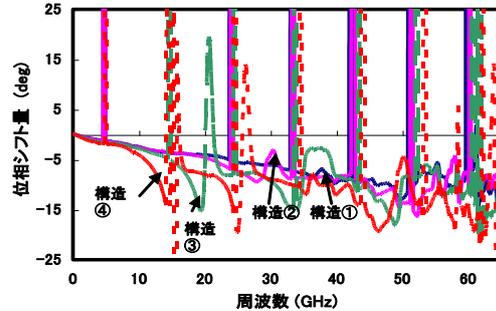


図3 位相変調特性(10V)

一方、このような共振効果が現れる周波数  
の近傍では、損失が大きくなる事も知られて  
いる。損失と位相変調量の周波数依存性を詳  
しく調べて見ると、損失のピークが高い周波  
数側に少しずれるため、マイナス側へ位相変  
調量が大きくなっている周波数帯ではそれ  
ほど損失が増えない事が明らかになった。実  
際に、単位損失当たりの位相変調量で評価す  
る性能指数(FOM)の周波数依存性を計算し  
てみると、図1の位相変調量が波打つ低周波  
側ピーク付近で性能指数が大幅に改善され  
る事が分かった。現在のところ、共振効果が  
得られる周波数帯を自由に設計する為の  
方法は明らかになっていないが、適当な周波  
数帯を選べば位相変調量、性能指数共にこれ  
までの単純な電極形状に比べて数倍程度の  
大幅な改善効果が期待できる事が明らか  
になった。

##### (2) 誘電体基板の最適化による改善効果

これまで、低損失な高周波用の誘電体基  
板として古くから知られているアルミナ基  
板を用いて形成されたCPWを用いてきた。  
しかし、30GHz 程度以上の高い周波数領  
域ではアルミナ基板自身の損失の影響も大  
きくなり、素子全体の性能を制限する問題  
に直面した。そこで、誘電体基板および電  
極構造の見直しを行い、更に高い周波数  
領域における良好な液晶位相変調器の動  
作を目指した。

本研究ではガラスファイバーとテフロン  
樹脂の複合材料からなる低誘電率基板を用  
いたCPWを基本構造として液晶位相変調器  
を設計し、図4に示すような素子の試作を  
行った。ここでは、上部電極として単純な  
長方形電極を用いている。

基板上部へ導入する液晶セルの厚さを变化させて位相変調特性を測定した結果を図5に示す。これまでの結果に比べて、2~3倍程度の大きな位相変調量が得られている。また、上部電極の損失と電界強度の関係から、適当な液晶層の厚さにおいて最大の位相変調効果が得られる事も分かった。いずれの場合も、良好な直線的関係が50GHz以上まで確認されており、周波数特性も大幅に改善された。

性能指数を用いた評価の結果を図6に示す。(1)項における共振特性を導入して得られる最大性能指数程度の値が広い周波数領域で達成されている事が確認できた。また、性能指数の改善効果は、高い周波数領域で特に顕著であり、ミリ波応用に対して有用な設計指針が得られた。これらの試みの結果、10mm程度のセル構造によって50GHzで50°程度の位相変化が得られている。

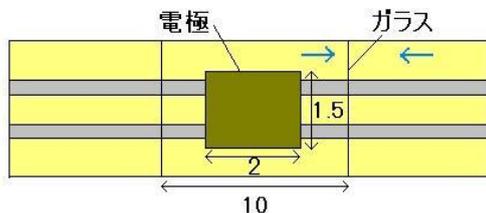


図4 低誘電体基板を用いた素子の構造

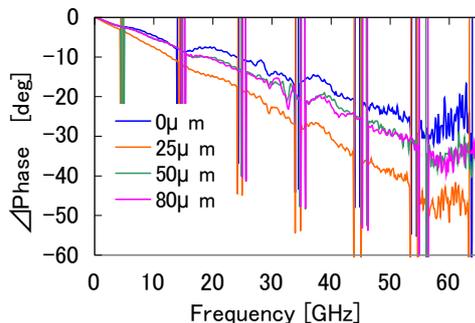


図5 位相変調特性 (10V)

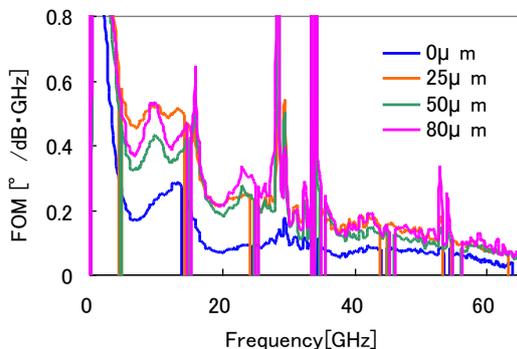


図6 性能指数による評価

### (3) CPWセル構造のセンシング応用の検討

液晶材料のミリ波帯での応用を検討する場合に、少なくとも屈折率と損失の値は、デ

バイス設計において欠かせないデータである。しかし、この周波数領域の液晶材料のデータはほとんど知られておらず、扱い易い測定法の開発自体が望まれている所である。これまで、優れた伝送路の一つである導波管に液晶材料を封入して、ミリ波伝搬特性の変化から内部の液晶材料の屈折率および損失を求める方法が提案されている。しかし、ミリ波帯における小型導波管でさえ内部を全て満たすためには多量の液晶材料が必要となり、材料センシング法としては大きな問題があった。また、導波管はそのカットオフ周波数特性から使用可能となる周波数帯がサイズによって細かく分かれており、使い易さの点からも問題があった。

これに対して、本研究で開発した平板型のセル構造では、内部に導入される材料が桁違いに少なくなり、極めて高感度な材料センシング法としての応用も期待できる。また、CPW基板は導波管のようなカットオフ特性を持たないため、低周波から高周波の測定限界まで一つのセルで測定が可能となる。

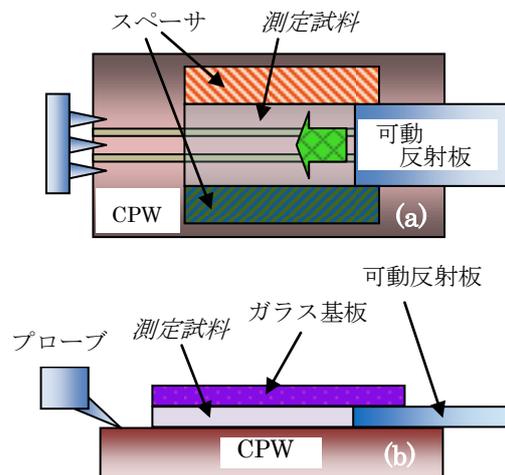


図7 CPWを用いた測定用セルの構造 (a)上面図、(b)側面図

図7に材料測定用に開発したCPW測定セルの構造を示す。ミリ波はプローブを介してCPWの左側から入射し、測定セル内を伝搬して右側から挿入されたショート板(反射板)によって反射される。測定は、液晶層を一往復した後のミリ波の振幅と位相を反射波として測定する事になる。ここで、右側の電氣的ショートによる反射板は可動型になっており、可動ショートを長さxだけ変化させると液晶層の伝搬長が2xだけ変化する事になる。両者のミリ波伝搬特性の差を取る事により、反射板の不完全さ等の伝搬特性を劣化させている固定要因を取り除く事ができる。可動ショートを用いる方法は、導波管を使った測定法においても用いられ、高い測定精度が実証されている。また、液晶材料の評価では、

分子配向処理を行う事により異方性について評価する事も重要である。しかし、可動ショートをスライドさせる方法では、基板表面処理を行った電極表面の分子配向効果が一度の操作で破壊されてしまう事になる。そこでここでは特別な配向処理を行わずに、平均値としての液晶材料の損失と屈折率の測定を行い、本手法の有用性についての確認を行った。

測定用セルに典型的な液晶材料(5CB)を導入して反射特性の測定を行い、10GHzにおける各伝搬長に対する反射振幅の値をプロットした結果について図8示す。液晶の伝搬長と共にほぼ直線的に損失が増える様子が見られ、この傾きから損失係数を見積る事ができる。導波管を用いたこれまでの測定結果によると、この周波数領域での液晶材料の損失はかなり小さな値であるが、マイクロリットル程度の測定試料があれば十分観測可能である事が確認された。

また、液晶の伝搬長が2mm変化した時の位相の変化量を測定した結果を図9に示す。mm程度の長さの変化が位相の変化として明瞭に測定できている事が分かり、十分な感度が得られている事が確認された。

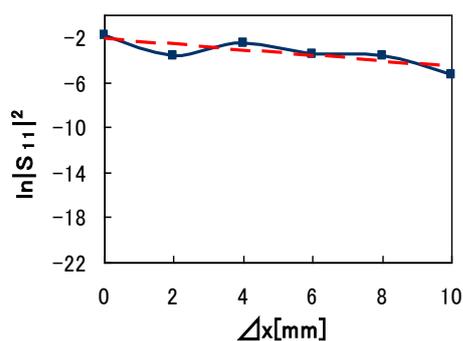


図8 測定セルの反射特性

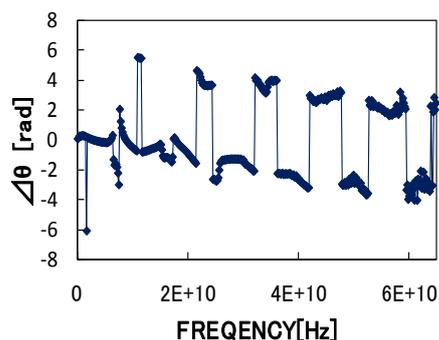


図9 測定セルの位相特性

ところで、CPWを伝搬するミリ波は、基板誘電体内部と上部液晶層の両者の屈折率を感じながら伝搬している。従って、ここで測定されている損失や屈折率は両者の平均的な値となってしまう、上部に導入された試料

の正確な値を導出するためには、何らかのキャリブレーション法を確立する必要がある。しかし、大まかな見積もりによる損失や屈折率の値は、測定のばらつきを考慮するとこれまで導波管で測定されている値と同等な値が得られており、極めて少量の測定サンプルで測定が可能となる扱いやす測定手法としての可能性は確認されている。

#### (4) 新しい可能性の検討

前述のセンシングセルの定量性の考察において問題提起された通り、CPW基板を伝搬するミリ波は液晶材料と下部誘電体基板の両者の影響をほぼ同等に受けている。従って、位相変調器としての動作において液晶材料の屈折率を変化させても、伝搬するミリ波に対する変調効果は半減する事になる。CPWを用いる手法は集積化に極めて有利な一方で、位相変調特性の観点から見ると従来のマイクロストリプライン(MSL)を基本回路として用いる手法の方が優れている。

そこで、今後の新たな展開を念頭に、MSL回路を基礎に置きながらCPWの集積化の容易さを併せ持つ全く新しい素子構造についての検討を行った。この分野のMSL回路の歴史は古く技術的な資産も多いため、アンテナアレイを含めた最終的な液晶集積化機能デバイスを実現する事を目指す立場からすると大変魅力的である。

ここで、CPW基板を用いた場合と同様にMSL回路の上部にセル構造を集積化して用いるためには、MSL誘電体基板中を伝搬するミリ波を基板上部へ導く変換回路が必要になる。すなわち、セル構造をMSL回路の一部に導入して液晶を誘電体として用いる反転型MSL回路を基板上部に形成するが、ミリ波の伝搬経路を切り替える何らかの仕組みが不可欠となる。

ここでは、FDTDシミュレーションを用いた解析によって、通常のMSL回路と反転型MSL回路の間に適当な長さのストリップ導波路を設置する方法を見出した。まだ、シミュレーションによって可能性が検討されている段階であるが、他の回路素子との集積化を行う上で、MSL基板をベースとする手法が有利になると思われ、新たな展開に対する有用な指針が得られた。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計10件)

- ① T.Nozoekido, S.Maeda, N.Miyasaka, H.Okada, T.Nose and T.Murai, "A Millimeter-wave Quasi-optical Grid Phase Shifter Using Liquid Crystal", IEICE Electronics Express, Vol.7, pp.67-72(2010).
- ② T.Nose, T.Miyamishi, R.Ito, and H.Honma, "Rotational Behavior of Stripe

Domains Appearing in Hybrid Aligned Chiral Nematic Liquid Crystal Cells", JJAP, 49 (2010)051701.

- ③ R.Ito, T.Nose, M.Ozaki, K.Takeya and M.Tonouchi, "THz Wave Transmission Properties of LC Composite Membrane Films", MCLC, Vol.516, January (2010), pp.144-151.
- ④ T.Nose, Y.Terui, M.Mizumoto, K.Okano, H.Muraguchi, N.Ozaki, R.Ito, M.Honma, "Microscopic Birefringence Imaging by Phase Shift Interferometry Using a Liquid Crystal Phase Shifter", Proc. SPIE, Vol.7414, 741408(2009).
- ⑤ M.Honma, T.Nose, S.Yanase, R.Yamaguchi, S.Sato, "Liquid Crystal Variable Focus Lenses with a Spatially Distributed Tilt Angles", Optics Express, Vol.17, No.13, pp.10998-11006(2009).
- ⑥ T.Nose, S.Yanagihara, Y.Sato, R.Ito and M.Honma, "Improvement of Phase-Shifting Properties in Coplanar Waveguide-Type Liquid Crystal Millimeter-Wave Phase Shifter by Introducing a Resonant Phenomenon", JJAP, Vol.47, No.11, pp.8483-8486 (2008).

[学会発表] (計 28 件)

- ① T.Nose, S.Yanagihara, R.Ito and M.Honma, "Refractive Index Measurement of LC Materials by Using Coplanar Wave Guide Test Cell in Super-High Frequency Electromagnetic-Wave Region", 23th ILCC 2010, P-2.197(2010.7.13).
- ② 能勢,川上,伊藤,笹森,磯田, 渡辺,伊藤,柳原,伊東,本間,"マイクロストリップラインを用いた液晶位相変調器の基礎特性",2010 年日本液晶学会討論会, 3C08(2010.9.8).
- ③ T.Ito, R.Ito M.Honma and T.Nose, "Fundamental Properties of Extremely Thick PDLC by Using Porous PMMA Materials", 17th IDW2010, LCTp1-12L, 67(2010.12.1).
- ④ 岩瀬,伊東,本間,能勢,"くし型電極構造による液晶の駆動特性",平成 21 年度電気関係学会東北支部連合大会(東北文化学園大(仙台), 8/20-21)
- ⑤ 能勢,堀川,柳原,伊東,本間「低誘電率 CPW 基板を用いた液晶ミリ波位相変調器の基礎特性」,3a03、2009 年日本液晶学会討論会(東京農工大)
- ⑥ T.Nose, E.Birukawa, Y.Sato, S.Yanagihara, R.Ito and M.Honma, "Refractive Index Measurement Method for LC Materials in MMW Region by Using CPW Substrate", IDW2009, LCTp3-5 (Miyazaki,12/9-11)

⑦ 能勢,柳原,蓮實,佐藤,伊東,本間,"CPW 型液晶ミリ波位相変調器における電極形状の影響",2008 年電子情報通信学会総合大会,シンポジウム S-17(2008).(招待)

⑧ 能勢,柳原,佐藤,伊東,本間,"パターン電極を導入した CPW 型液晶ミリ波位相変調器の特性",2008 年日本液晶学会討論会, 3a17

⑨ T.Nose, T.Miyaniishi, R.Ito and M.Honma, "Diffraction Properties of Stripe Domain Observed in N\* LC Cells with Various Surface Alignment",The 22<sup>nd</sup> ILCC,Jeju, PAT22(2008).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

能勢 敏明 (NOSE TOSHIAKI)

秋田県立大学・システム科学技術学部・教授

研究者番号: 00180745

### (2) 研究分担者

本間 道則 (HONMA MICHINORI)

秋田県立大学・システム科学技術学部・准教授

研究者番号: 90325944

伊東 良太 (ITO RYOUTA)

秋田県立大学・システム科学技術学部・助手

研究者番号: 20433146

### (3) 連携研究者

蒔戸 立夫 (NOZOKIDO TATSUO)

富山大学・工学部・准教授

研究者番号: 00261149