

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：21401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560405

研究課題名(和文) 平板回路上に集積化して形成する液晶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 Millimeter-wave Control Device Obtained with the Integration on Planar Type 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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円、(間接経費) 1,110,000円

研究成果の概要(和文)：マイクロストリップラインの基板上面に液晶層を形成する素子構造によって実現されるミリ波位相変調器の開発を行った。本素子で最も重要な、誘電体基板中を伝搬するミリ波を基板上面へ導く変換回路の最適化による動作周波数の改善を行い、50GHz以上のミリ波帯での動作を達成した。また、素子の小型化を目指したメアンダー電極構造の導入による液晶分子配向状態の変化、および相補的な位相変調動作の実現を目指したn形液晶における分子配向状態を明らかにした。これらの結果を基に、アンテナアレイと位相変調器との集積化デバイスについて検討を行った。

研究成果の概要(英文)：Planar type millimeter-wave liquid crystal (LC) phase shifter is developed based on the micro-strip-line. Structure of the conversion circuit, which is the key part of the novel LC phase shifter, is optimized to improve the operational frequency. Transmission loss of the phase shifter especially in the high frequency region is significantly improved and operational frequency comes up to the millimeter wave region over 50GHz.

LC Molecular orientation state under the meander electrode structure, which is useful for downsizing the device, is investigated in detail. Basic molecular orientation phenomena are also investigated by using negative dielectric anisotropic LC material, which is necessary for complementary operation. Based on these results, integration of antenna array system with the LC phase shifter is investigated.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電子デバイス・電子機器

キーワード：液晶デバイス ミリ波位相変調器 ビームステアリング

### 1. 研究開始当初の背景

電磁波の周波数スペクトルにおいて、光と電波の間にあるミリ波・THz 波領域は、これまで利用が進んでいない未開拓な領域であったが、最近の新しい信号発生・検出技術の進歩に伴い新しい応用分野の創生が期待される注目分野に発展している。特にミリ波帯は、高速無線アクセスシステム、車載レーダー、新しいセンシング技術の大きく3つの具体的な応用が検討されている。今後具体的な応用システムの実現において、ミリ波を制御する為の様々な扱い易いデバイスが必要になる事が予想される。

一方、液晶は大きな電気光学効果を生じる優れた材料として知られており、ディスプレイを始めとする光波制御用のデバイス応用が進められている。これまで、光波領域での物性だけが注目されてきたが、市販のディスプレイ用に開発されている液晶材料が新しい電磁波領域として期待されているミリ波・THz 波領域でも大きな複屈折を示す事が分って来た。従って、小型軽量で低電圧低電力を特徴とする液晶デバイスの優位性は、ミリ波・THz 応用においても期待できる。そのような考えから申請者らは、具体的な応用が進んでいるミリ波帯に注目してミリ波の伝搬を制御する液晶ミリ波制御デバイスの実現を目指した取り組みを行った。

ミリ波帯において液晶デバイスを実現するアプローチとして準光学的手法による手法、および電子回路に集積化する方法の2種類の立場がある。前者は、光領域で進められている種々の液晶光制御デバイスの構造を、波長に応じてスケールアップする事によって実現できる可能性がある。しかし、光波領域に比べると桁違いに波長が長い領域であるため、極めて大きな構造を実現する為の新しい液晶デバイス形成技術が必要になる。特に、桁違いに厚い超厚膜液晶層を実現する技術は大きな課題である。なぜなら、液晶デバイスにとって通常大面積化は容易であるが、厚さ方向の拡大は応答速度の致命的な増加を生み、単純なスケールアップは現実的な解決法にならない。

これに対して電子回路に集積化する手法では、ディスプレイ等の通常の平板型セル構造をそのまま利用できるため、これまで蓄積されている液晶デバイスの製造技術をそのまま利用する事ができる。また、液晶層厚の極端な増加を防ぐ事が出来るため、比較的早い応答速度が実現できる可能性もある。しかし一方では、例えば位相変調器応用を考えた場合、その位相変調量はデバイスの大きさ(伝搬長)と波長の関係で決まる為、桁違いに長い伝搬長が必要になる点は変わらない。従って、通常の光デバイス応用ではほとんど問題にならない液晶材料のわずかな損失が、ミリ波応用ではデバイスの大きな損失を生む可能性がある。材料の最適化は、最終的なデバイス性能を決定する上で残された大き

な課題になっている。

### 2. 研究の目的

本研究では、これまで調べられている市販の液晶材料の中で比較的大きな複屈折を有する材料を用いて、優れた位相変調器の実現を試みた。従来、優れた平板回路として広く使われているマイクロストリップライン(MSL)や集積化に有利な平板回路として知られているコプレーナ線路(CPW)を用いて液晶位相変調器を実現する試みが行われている。MSL 型は、電磁波が誘電体基板内に集中して伝搬する構造になっているため、誘電体基板の一部を液晶材料に置き換える構造を導入する事などにより、大きな可変特性を有する位相変調器が実現されている。一方 CPW では、信号線とグランド電極が同一平面上にあるため、トランジスタを始めとする他の素子との集積化が容易に行える優位性がある。従って、CPW の上面に適当なセル構造を導入して液晶位相変調器を集積化する事も容易に行える。しかし、CPW では電磁波が下部誘電体基板と上部に集積化した液晶層の両者の誘電率を感じながら伝搬するため、液晶の誘電率変調効果が半減する問題がある。

そこで本研究では、MSL 構造を基本として液晶層を反転型の MSL (I-MSL) として基板上面に集積化して形成する方法を検討した。このとき、通常通り MSL の誘電体基板を伝搬する電磁波を、上部へ集積化した I-MSL の誘電体としての液晶層に導く、全く新しい電磁波の伝搬経路を変換する回路が必要になる。そこで第一に、本液晶位相変調器においてキーとなる変換回路の設計を行うと共にその最適化を行った。これにより、良好な位相変調特性を有する MSL の特性を維持しながら、CPW 型の持つ集積化の容易性も併せ持つ液晶ミリ波位相変調器を実現する事が可能になる。

### 3. 研究の方法

キーとなる変換回路は、FDTD 法による電磁界シミュレータを用いて設計を行った。特に、通常の MSL 部分のグランド電極と I-MSL 部分の上部グランド電極が変換回路部分で交差しているが、それらをつなぐスルーホールとの位置関係が変換回路部分の効率に大きな影響を与える事が明らかになった事から、スルーホールの数と配置の関係について最適化を行った。

次に、位相変調量を増加させる為に線路長の延長が必要となるが、デバイスの大型化を避けるために線路の折れ曲がり構造(メアンダー構造)を導入する手法は、高周波平板回路の取り扱いとしてはスタンダードな方法である。しかし、電磁波の伝搬経路として働く電極は、同時に液晶位相変調器における液晶分子の駆動に用いられるため、折れ曲がり構造による液晶分子配向効果への影響を詳

細に調べておく必要がある。

次に、種々の液晶材料を用いて位相変調特性を調べ、得られる変調特性および損失特性について比較検討を行った。特に新しく開発された高複屈折液晶材料の優位性について検証を行った。

更に、位相変調器の基本構造についてある程度の最適化が達成され段階で、平板アンテナとの集積化の検討を行った。アレイ化に伴って有用となる n 形液晶を用いた位相変調器の検討を行った。まず、ITO ガラス基板を用いて、設計した MSL を基本とする位相変調器と同じ電極構造を有する観察用の液晶セルを作製し、内部の液晶分子の駆動電界に対する分子配向状態を詳細に調べた。また、アンテナアレイとの集積化における基本構造の設計を行った。

#### 4. 研究成果

本研究によって実現された、反転 MSL (I-MSL) 構造の導入による MSL 型液晶ミリ波変調器の構造を図 1 に示す。本素子は、大きく 3 つの部分で構成されている。両端は、通常の MSL 線路であり、基板上面の中央部に適当なスペーサを介して電極を兼ねた金属板が導入され、液晶材料を封入するセル構造が形成されている。基本的に通常の液晶デバイスと同様なサンドイッチ構造になるため、基板表面の分子配向処理法やセルの構成手法としてこれまで実績のある液晶素子作製に用いる手法をそのまま利用することができる。液晶導入部分は、上部がグランド電極になった I-MSL 構造になっており、両端の MSL 線路と I-MSL 部分の間で電磁波の伝搬経路を下部誘電体と上部へ導入した液晶層との間で切り替える新しい回路が必要になる。このような動作を実現する為に、両者の間に変換回路を設置している。基本構造は、H20~H22 の科学研究費補助金による研究成果として設計された構造であるが、これまでミリ波帯での動作は実現されていなかった。本研究では、素子構造の見直しによって損失を低減し、素子動作周波数をミリ波帯に達する高い周波数まで向上させる事を目指した。

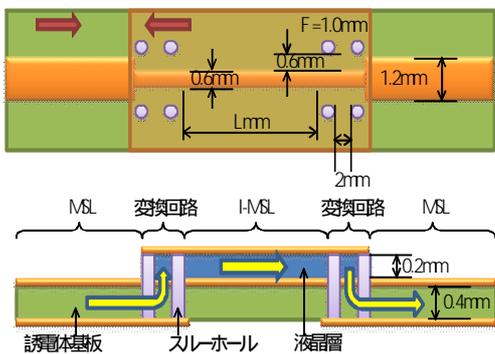


図 1 MSL 形液晶ミリ波位相変調器の構造

素子の最適化において、最も効果が大きかったスルーホールの配置調整の検討結果に

ついて詳しく述べる。最適化は、図 2 に示すシミュレーションモデルを用いて検討を行った。ここでは、図 1 に示した実際の素子構造の半分だけを用いて、最も重要な変換回路部分におけるスルーホールと信号線の距離を変化させている。スルーホールの設置場所は、信号電極から十分に遠ざける方向へ調整して最適な設置場所を検討するのが常識的なやり方である。しかし、ここでは従来の設置位置から信号線路へ接近させた場合の効果について調べた。

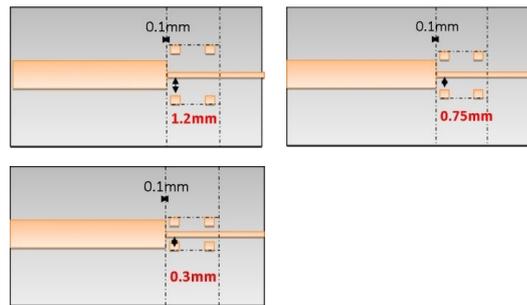


図 2 スルーホールの位置による透過特性のシミュレーションモデル

これらの解析モデルにおける反射および透過振幅のシミュレーション結果を、図 3 に示す。反射特性を見ると、スルーホールの位置を変化させても反射率の値は全般に小さな値に保たれており大きな値の変化は無いようである。しかし、スルーホールと信号線間の距離が長い場合に 30GHz~40GHz 付近で観察されるディップ構造が、スルーホールが信号線に近づくにつれて消える様子が分かる。また、高い周波数領域において反射率がやや低下する傾向も見られる。

一方透過特性を見ると、信号線までの距離が長い場合には 30GHz 以上の高い周波数領域に現れるディップ構造によって透過率が大幅に低下しているのに対して、スルーホールが信号線に近づくにつれてディップ構造が次第に高周波側へ移動する様子が見られる。その結果、高い周波数領域における透過率が大幅に改善されることが明らかになった。高周波回路設計における常識に反する方向への位置調整であるが、本素子における動作周波数の改善に大きな効果がある事が明らかになった。また一方では、全てのカーブが周波数が上がると共になだらかに透過率が低下する共通のカーブに収束するようにも見える。これは、本素子構造の本質的な制限要因とも考えられるため、その原因を明らかにする事が今後重要になると思われる。

シミュレーション結果に基づいて実際に素子を作製し、ベクトルネットワークアナライザ (VNA) を用いて、透過振幅および透過位相変化の測定を行った結果を図 4 に示す。液晶駆動の為に、高周波を伝搬させる MSL 電極を共通に用いて、バイアス T 回路を介して 20Hz で最大 8V の交流電圧を印加した。液晶

材料の損失によって実際に得られる透過率はかなり低くなっている。しかしこれまで得られているデータに比べると、50GHz 付近までは -15dB 程度の値に改善されている。50GHz より高い周波数では急激に透過損失が増える様子が見えるが、測定に使用したコネクタの損失も含まれているため素子自体の特性は、更に詳しい検証が必要と思われる。

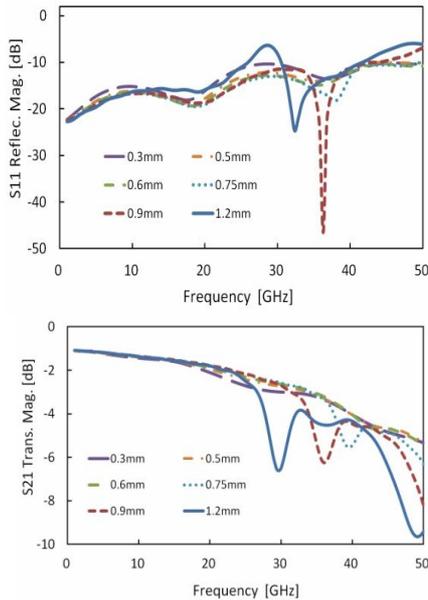


図3 (a)反射 S11 および(b)透過 S21 のシミュレーション結果

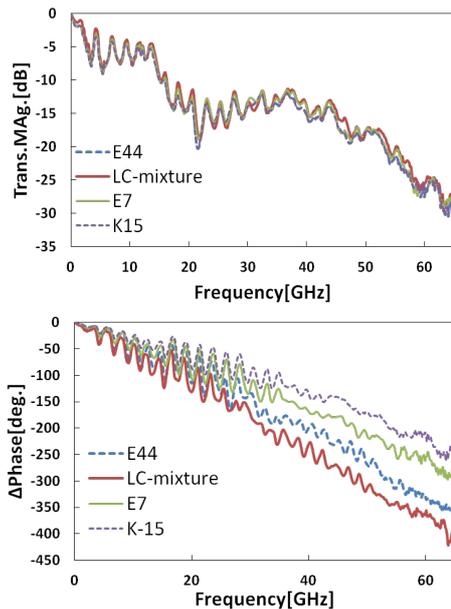


図4 液晶位相変調器の(a)透過振幅および(b)透過位相変調特性

液晶材料の違いに注目すると、最もスタンダードな K15 の損失が大きく、E7 と E44 は同程度で中間的な損失特性を示している。一方、新しい合成されたイソチオシアネート系の液晶 (LC-Mixture) は、全般に透過率が高く

特に高い周波数領域での損失が低いことが明らかになった。

次に位相変調特性を見ると、位相特性に小さな揺らぎが現れているがほぼ周波数に対して直線的な変化特性が得られており、低周波からミリ波帯に達する広帯域な位相変調特性が得られている事が分る。高い周波数領域では図4 (a)のように損失は大きくなるが、これまでミリ波帯では位相変調動作が確認されていなかったのに対して、少なくとも 65GHz まで良好に位相変調効果が得られている事が確認された。

いくつかの周波数に対して、液晶層への印加電圧と位相変調量の関係性を調べた結果を図5に示す。液晶分子の電圧応答に特有なしきい値が観察されるが、1V から 7V 程度の電圧で連続的に位相変化が生じる可変特性が確認された。液晶層の厚さは 200 $\mu$ m であり、ディスプレイ等の通常の液晶セルに比べるとかなり厚いため、現状では応答時間は数秒程度、戻り時間は 1 分程度必要である。

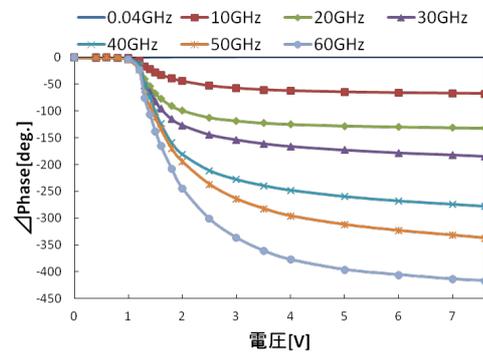


図5 印加電圧に対する位相変化特性

ところで、実際にアンテナレイ等との集積化に伴って位相変調量を調整する為に、適当な線路長を設定する必要が生じる。その際、素子全体の大きさを小さく抑えるために、線路の折れ曲がり構造 (メアンダー構造) を導入する事は、良く用いられる手法である。しかし、このような複雑な電極構造を液晶層内に導入する場合には、駆動電界が液晶分子配向効果に与える影響について調べておく必要がある。そこで、透明電極付ガラス基板を用いてメアンダー電極構造を導入した液晶セルを作製し、偏光顕微鏡等を用いて内部の液晶分子配向効果を調べた結果を図6に示す。

MSL の電極は、グラウンドの平板電極に対して細い信号電極が対向するような非対称な電極構造になっている。初期の分子配向処理は、細長い液晶分子の軸が信号線に平行に一樣に並ぶように処理されている。電圧印加と共に、分子長軸が電界に平行になるように配向状態を変化させるため、全般的に液晶分子は基板に平行な状態から垂直な状態へと配列状態が変化する事になる。このときミリ波に対する誘電率は、分子の長軸が短軸より大きいため、電圧印加で分子は立ちあがると共

にミリ波の感じる誘電率も大きくなり透過位相が変化する事になる。しかし、実際には細い信号電極端のエッジ効果によって左右対称な斜め電界が生じ、左右で反対方向への分子配向効果が生じる。この違いは、分子配向方向の異なるドメインを発生させて、その境界にはディスクリネーションラインと呼ばれる欠陥構造が生じる事になる。その挙動は液晶分子の応答特性に大きく影響するため、詳しく調べておく必要がある。

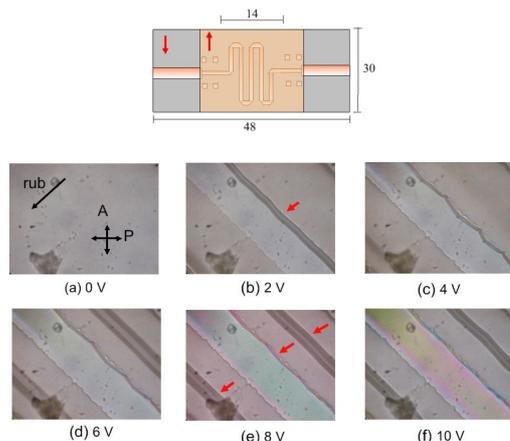


図6 メアンダー電極付近での液晶分子配向効果の観察

図6 (b)に示すように、2V程度の小さな印加電圧で信号電極端付近にディスクリネーションラインが発生する様子が分かる。発生位置が電極中央ではなく大きく偏っているのは、基板表面のラビングによる分子配向処理によってわずかに分子が一方向に立ち上がる(プレティルト)効果によるものである。図6 (c)~(d)のように、電圧が高くなると共にディスクリネーションラインが細くなり、ほとんど電極エッジに固定される。図6 (e)~(f)を見ると、更に電圧が大きくなるとメアンダー構造によって、信号電極と隣の信号電極の間に挟まれた部分にも電界の効果が及んで液晶分子が配向し始める為、電極間の中央部にもディスクリネーションラインが発生する様子が見られる。こちらは、電圧を10V程度まで高くしても電界はそれほど大きくならないためディスクリネーションラインは太いままである。

信号電極間の太いディスクリネーションラインは、信号線を伝搬するミリ波への影響は小さいと思われる。一方、信号線エッジ部分のディスクリネーションラインは、その分子配向の乱れが誘電率変化に悪影響を及ぼす可能性も考えられるが、電極エッジの極めて細い範囲に限定された影響であると考えられ、位相変調効果への影響は小さいものと思われる。メアンダー構造を導入した液晶ミリ波位相変調器の実測データによると、直線型の場合に比べて単位長さ当たりの位相変調量が大きく低下する現象が確認されている。メアンダー構造による液晶分子配向効果

の乱れが生じている事が予想されたが、分子配向欠陥であるディスクリネーションラインの発生は限定的で予想される範囲内のものであり、位相変調量の低下を説明できるような乱れは確認できなかった。メアンダー構造は、実際の集積化デバイスを実現する上で重要になる事が考えられるため、性能の低下問題は今後の展開において解決しなくてはならない課題の一つである。

ある程度の液晶ミリ波位相変調器の構造が最適化された成果を基に、アンテナアレイとの集積化について検討を進めた。この場合、位相の変化方向が逆になる相補的な動作をする位相変調器を組み合わせると、システム設計の簡略化に有用になる可能性がある。そこで、通常のp形液晶とは分子配向動作が逆になるn形液晶を用いた位相変調器を実現する為に、まずその分子配向効果について調べた。n形液晶材料の場合は、電界方向に対して分子軸が垂直に配列する性質を示すが、その長軸方向を一意に決める要因が存在しない。従って、初期の何らかの方向付けを生じる因子が導入されない場合には、電圧印加時に多数の配向欠陥が生じてしまい動作速度を大幅に低下させる問題が生じる。しかし、実際に透明電極を有するセルを作製して観察を行ったところ、電極中央部に1本のディスクリネーションラインが発生するのみで、大きな乱れは生じない事が分かった。これは、信号線エッジの斜め電界の効果で分子の傾き方向が規定され得るため、ほぼ均一な配向効果が誘起されているためと考えられる。

以上のように、アンテナアレイとの集積化デバイスを実現する為には、いくつかの解決すべき課題も明らかになったが、MSL上に集積化して構成する液晶位相変調器のミリ波帯での良好な動作を実現し、MSLを基本構造としながらCPW型の位相変調器のような集積化に有利な特性を持ち合わせた新しいタイプの液晶ミリ波位相変調器が実現された。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 7件)

T. Nose, Y. Ito, T. Isaka, L-C. Chien, O. Catanescu, A. Golvin, Y. Isota, T. Sasamori, R. Ito, and M. Honma, "High frequency performance extending to millimeter-waves in inverted- microstrip- line-type LC phase shifter", Proc. SPIE, 査読無, 8642, 864206-1-10(2013).

T. Nose, L-C. Chien, O. Catanescu, A. Golvin, Y. Ito, T. Sasamori, Y. Isota, R. Ito, and M. Honma, "Improved high-frequency performance of microstrip-line-type liquid crystal phase shifter", Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, 52, 09701-1-5(2013).

M. Honma and T. Nose, "Highly efficient twisted nematic liquid crystal polarization gratings achieved by rubbing", Appl. Phys. Lett., 査読有, 101, 041107-1-4(2012).

T. Nose, T. Ito, T. Watanabe, K. Ito, S. Yanagihara, R. Ito, and M. Honma, "Preparation of porous polymer materials for bulky liquid crystal devices", Proc. SPIE, 査読無, 8279, 827909-1-8(2012).

R. Ito, T. Kawakami, Y. Ito, T. Sasamori, Y. Isota, M. Honma, and T. Nose, "Fundamental properties of novel design microstrip line type liquid crystal phase shifter in microwave region", Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, 51, 04104-1-5(2012).

R. Ito, T. Kumagai, H. Yoshida, K. Takeya, M. Ozaki, M. Tonouchi, and T. Nose, "THz nematic liquid crystal devices using stacked membrane film layers", Mol. Cryst. & Liq. Cryst., 査読有, 543, 77-84(2011).

R. Ito, S. Yanagihara, K. Ito, T. Watanabe, T. Nose, and M. Honma, "Basic performance of refractive index measurement method for LC materials in super high frequency region by using coplanar wave guide", Mol. Cryst. & Liq. Cryst., 査読有, 543, 92-100(2011).

[学会発表](計 16件)

M. Nagasawa, T. Komuro, T. Sasamori, Y. Isota, T. Watanabe, K. Ito, R. Ito, H. Honma, and T. Nose, "Basic performance of twin antenna array system combined with liquid crystal MMW phase shifter", APMC2014.

T. Nose, T. Komuro, T. Sasamori, Y. Isota, T. Watanabe, K. Ito, R. Ito, and M. Honma, "Fundamental performance of liquid crystal millimeter-wave phase shifter using negative dielectric anisotropic materials", IRMMW2014.

T. Nose, T. Iisaka, Y. Ito, T. Sasamori, Y. Isota, R. Ito, M. Honma, T. Watanabe, and K. Ito, "Planar type liquid crystal phase shifter based on the microstripline structure", IRMMW2013, Mo P1-25(2013).

T. Nose, T. Ito, R. Ito, M. Honma, T. Watanabe, K. Ito, S. Yanagihara, "Preparation of porous polymer materials for bulky liquid crystal devices", Photonics West 2012, 8279-08(2012).

T. Nose, T. Ito, H. Makka, R. Ito, M. Honma, T. Watanabe, K. Ito, and S. Yanagihara, "Porous PMMA films fabricated by solution casting for PDLC type LC devices", IDW2012, LCTp1-13L(2012).

R. Ito, H. Asanuma, T. Kumagai, H. Yoshida, M. Tonouchi, M. Ozaki, and T. Nose, "Introduction of LC material to diffraction type THz device", ILCC2012, P-157(2012).

T. Nose, T. Iisaka, Y. Ito, T. Sasamori, Y.

Isota, R. Ito, and M. Honma, "Planar type liquid crystal phase shifter based on the microstripline structure", ILCC2012, P-116(2012).

鈴木、伊東、本間、能勢、"Si 基板を用いた CPW における光照射効果"、2012 年日本液晶学会討論会、pB37(2012).

能勢、伊藤、笹森、磯田、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特性改善"、2012 年日本液晶学会討論会、3c01(2012).

鈴木、伊東、本間、能勢、"シリコン基板を用いたコプレーナ線路の基礎特性"、平成 24 年度電気関係学会東北支部連合大会、2B11(2012).

能勢、由利、伊東、本間、"ロール型電極構造を用いた液晶ミリ波レンズの基礎特性"、平成 24 年度電気関係学会東北支部連合大会、2I18(2012).

伊藤、笹森、磯田、伊東、本間、能勢、"新しいマイクロストリップライン構造を用いた液晶ミリ波位相変調器の基礎特性"、電子情報通信学会、発光型/非発光型ディスプレイ合同研究会、EID26(2012).

T. Nose, T. Seno, R. Yuri, R. Ito, and M. Honma, "Fundamental properties of Fresnel lens in MMW region for liquid crystal lens applications", IRMMW-THz2011, M3D.4(2011).

Y. Ito, T. Kawakami, T. Sasamori, Y. Isota, R. Ito, M. Honma, and T. Nose, "MMW liquid crystal phase shifter by using novel microstrip structure", IRMMW-THz2011, W5.36(2011).

伊藤、川上、笹森、磯田、伊東、本間、能勢、"マイクロストリップラインを用いた液晶位相変調器におけるセル構造パラメータの影響( )"、2011 年日本液晶学会討論会、pB50(2011).

伊藤、笹森、磯田、伊東、本間、能勢、"液晶ミリ波位相変調器における基板厚の影響"、平成 23 年度電気関係学会東北支部連合大会、2C06, 96(2011).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

能勢敏明 (NOSE TOSHIAKI)

秋田県立大学・工学部・教授

研究者番号：00180745

### (3) 連携研究者

荻戸立夫 (NOZOKIDO TATSUO)

富山大学・工学部・准教授

研究者番号：00261149