

導波型テラヘルツ移相器の実現と 2 自由度ビーム走査への応用

Study on waveguide integrated terahertz phase shifters
and its application to beam steering

2181031

研究代表者
(助成金受領者)

慶應義塾大学 理工学研究科

専任講師

門内 靖明

[研究の目的]

環境中に益々多くのセンサやロボット、ドローンなどの機械が分散していく IoT 時代においては、機械が人間の動作・意図を絶えず読み取りながら自律的に動作して人間をサポートすることが不可欠になると考えられる。本研究で取り扱うテラヘルツ波は、電波と光波の中間性ゆえに物体透過性と高解像力とを両立できるため、種々の不透明な素材越しに人間の動作をセンシングすることが可能となり、上記のような場面において有望である。しかし、テラヘルツ波の空間伝搬を制御するためのフェーズドアレイ技術は未だ確立されていない。そこで本研究では、テラヘルツビームを自在にステアリングするための基盤技術として、導波路と一体化されたテラヘルツ移相器を実現することを目的とした。具体的な周波数帯としては、大気減衰が少なく、かつ近い将来に安価な CMOS デバイスの動作が期待される 300 GHz 程度の周波数を取り扱うこととした。

[研究の内容, 成果]

液晶は電圧によって光学異方性を制御可能な物質であり、可視光帯のみならずテラヘルツ帯においても屈折率可変作用を有することが報告されている。特に、テラヘルツ帯では移相器

としての応用可能性を示した先行研究が存在するものの (Du et al, J. Mater. Chem. C. 4138, 2016), 現時点では自由空間光学系に基づく原理検証に留まっている。本研究では、テラヘルツ移相器の集積の実装を目指して、自由空間光学系ではなく導波構造と一体化された移相器の実現に取り組んだ。

具体的には図 1 のように、テラヘルツ帯において低損失な誘電体媒質として知られる COP (Cyclic Olefin Polymer) を基板とし、内部に液晶を封入しつつ表面に金属パターンングを施してマイクロストリップ線路 (MSL) を構成した。パターンングの特性インピーダンスおよびチョーク作用を最適化することで、線路に沿って伝搬するテラヘルツ波に影響を与えるこ

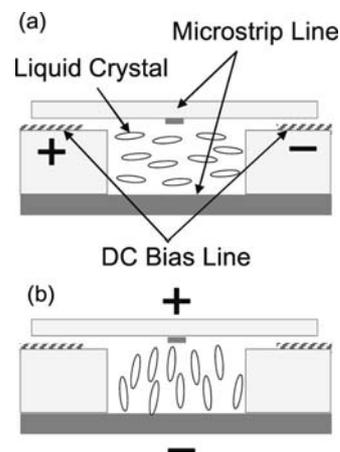


図 1 液晶屈折率変化に基づく導波型テラヘルツ移相器の概念図

となく同じ金属を直流電圧印加用電極としても利用できるようにした。

また、通常の液晶素子では、電圧を切ったときに液晶分子の向きを元の位置に復元するために配向膜が用いられるが、本研究では動作速度の向上のために、直交に近い2種類の静電場を印加できる電極構造を設けた。これにより、配向膜を用いることなくオンオフ両方ともアクティブに電圧制御できるようにすることを試みた。

作製されたデバイスを図2に示す。銅を蒸着後レーザーパターニングが施された2枚のCOPフィルム（厚み100 μm , 50 μm ）を熱圧着によって積層し、フラットなアルミ板の上に接着した。アルミ板は支持板かつグラウンド電極として機能する。アルミ板には液晶分子をシリンジで注入できるよう小さな穴が開けられている。作製されたマイクロストリップ線路の全長は11 mmである。実験に当たってはベクトルネットワークアナライザ（VNA）を用いて、線路の複素透過係数を測定した。マイクロストリップ線路への入出力結合のために、WR3.4規格の導波管TE10モードとマイクロストリップ線路の準TEMモードとを相互に変換できるように、線路の両端部にモード変換構造を設けた。VNAに周波数拡張器を取り付けることで、バイアス電圧を変えながら220-330 GHzの帯域にわたって複素透過係数（S21）を測定した。

図3にバイアス電圧を増加した場合の位相シフト量を示す。広帯域にわたる位相変化を確認でき、10 Vを印加することで330 GHzにおいて250°の位相シフト量が得られることを確認した。これは有限積分法に基づく全波シミュ

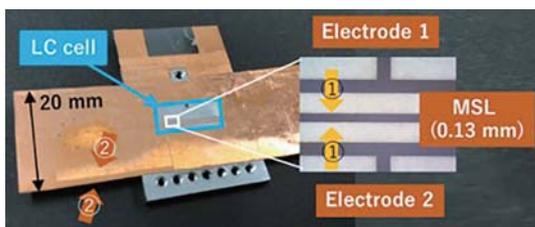


図2 作製されたデバイスの写真

レーションの結果とよく一致しており、また位相シフトが印加電圧・周波数に比例して増幅する点も理論式と一致する。なお、次に注目すべき点として1.0 V程度の低電圧における位相シフト方向が高電圧における位相シフト方向と反対方向であることが観察された。この点については後述する。

図4に挿入損失の実測結果を示す。複素透過係数（S21）の実験値は-35 dB前後であることが確認された。損失の大部分は基板となるCOPフィルムによる誘電損失であるため、より低損失な誘電体材料が利用可能になれば移相器全体の損失が大幅に低減されると期待される。また液晶分子の誘電正接の文献値によると、電圧印加に伴う配向方向では損失がより減少すると考えられるが、実験では逆に損失が増大することが確認された。現在、液晶分子の損失を独自に測定することで、文献値の正確性を検証中

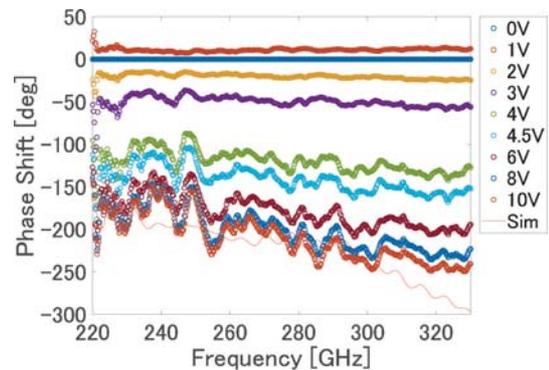


図3 電圧印加に伴う位相シフト

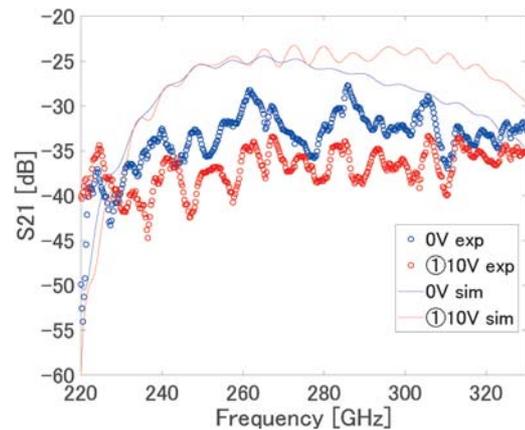


図4 挿入損失の実測結果

である。

次に、図3において1.0 V程度を印加したときに位相が正の方向にシフトしたことについてさらに検証を進めた。低電圧印加ステップを細かくして測定した位相シフト量を図5に示す。0 Vを基準に、おおよそ1.0 V程度まで正方向にシフトし、その後負方向にシフトし始め、約1.5 Vで位相変化がゼロに戻った。その後電圧を増大させることで、負方向のシフトを得た。

この現象を理解するために、マイクロストリップ線路を電極として図1(b)に示す方向(縦方向)に電圧を印加した際の電極近傍の静電場をシミュレーションにより解析した様子を図6に示す。矢印が電場の方向を示す。近傍を観察すると端部効果によって電場が縦方向よりも横方向に支配的となっていることがわかる。液晶分子を電場で配向させる際には閾値が存在する。設計時には縦方向の電場を増加させることで縦方向への配向を生じさせることを試みた。一方、縦方向の電場が閾値を超えないような低電圧の印加であっても、横方向には局所的に強

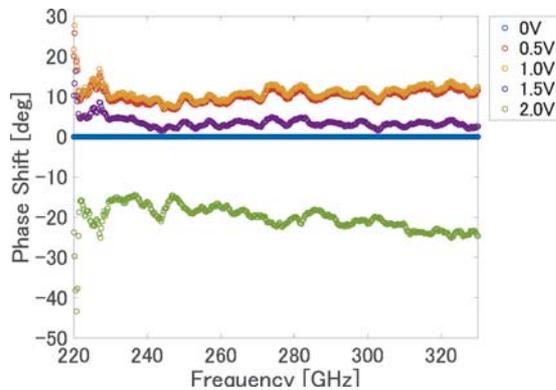


図5 低電圧領域における位相シフト

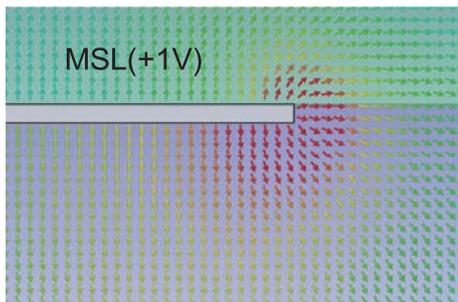


図6 マイクロストリップ線路 (MSL) 付近での静電場分布

い電場が生成されるため配向が生じる。この効果によって、低電圧においてまず位相が正方向にシフトした後に高電圧において負方向にシフトするという2段階の振る舞いが観察されたと考えられる。このような振る舞いは従来のマイクロ波帯の液晶移相器においても原理的には存在していた可能性があるが、我々の知る限り報告例は存在していない。より長波長のマイクロ波帯においては構造寸法が大きいために効果が相対的に小さくなり、観測されなかったことが理由として考えられる。

[今後の研究の方向, 課題]

本研究では、液晶を用いた導波型テラヘルツ帯移相器を作製し、11 mmの全長に対して10 Vを印加することで330 GHzにおいて250°の位相シフトが得られることを確認した。金属パターンニングのインピーダンスおよびチョーク作用を調整することで、テラヘルツ波をガイドしつつ液晶への直流電圧印加用電極としても機能する金属パターンニング手法を実現した。また低電圧において位相シフト方向の変化方向が逆転する現象を確認した。この現象を用いると、電極のバイアス方向を切り替えることなく、単純な電圧値の制御をするだけで位相シフト方向を制御できるため、回路の小型化・簡略化の点で有効性が大きいと考えられる。そこで、今後は電極構造の幅および形状の最適化を行い、印加電圧に伴ってより大きく正側から負側に変化する位相シフトを生成できるようにする。具体的には線幅を細くすることによって、端部効果をより顕著にするとともに、グラウンド面との間に形成される静電容量を小さくすることができ、応答速度を向上させられる可能性がある。

また、今回原理実証されたマイクロストリップ線路ベースの移相器をアレイ化することで、フェーズドアレイを構築することを試みる。既に申請者自身の先行研究により、導波構造と一体化されたテラヘルツ帯周期構造アンテナへの

給電周波数を掃引することで、1自由度ビーム走査が可能なが実証されている。しかし、周波数掃引だけでは2自由度走査は難しい。なぜなら、2自由度化のためには導波構造に沿った伝搬軸方向だけでなく、その直交方向にも変化する2次元的な位相勾配の生成・制御が必要なためである。そこで、屈折率変化と周波数掃引とを併用することで2自由度ビーム走査を実現することを目指す。そして、その応用例として、例えば送受信器を接続してレーダとして用いることで、遮蔽物越しのミリ分解能3次元計測を可能とする。なお、本研究では大型の送受

信器を外部接続して実験を行うことを想定しているものの、送受信器の集積化が進めば容易にシステム全体を集積化・ウェアラブル化できると考えられる。

[成果の発表, 論文等]

Yuki Takeda, Withawat Withayachumnankul, Yasuaki Monnai, "Study of Microstrip-Based Terahertz Phase Shifter Using Liquid Crystal," Proc. 44th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2019, Paris (accepted for poster presentation).