

## 導波管型液晶ミリ波制御デバイスの磁場駆動特性

能勢敏明<sup>1</sup>, 國井健汰<sup>1</sup>, 真坂護<sup>2</sup>, 伊藤謙二<sup>2</sup>, 伊東良太<sup>1</sup>, 本間道則<sup>1</sup><sup>1</sup> 秋田県立大学システム科学技術学部知能メカトロニクス学科<sup>2</sup> 由利工業株式会社

今年の4月初めアメリカが世界の先陣を切って5Gサービスを開始した。各国の競争の中で様々な技術様式が提案されている状況であるが、今後世界中で5Gサービスが本格化するに伴いミリ波帯の利用は必須になるものと考えられる。しばらく前からICT, IoT, 自動運転, AI 応用, スマート農業などの新しい技術が, スマートフォンに依存する情報通信関連企業だけでなく全く異なるビジネス分野からも広く期待を集めるようになってきている。しかし, これらを実現する為には超高速無線通信技術が不可欠であり, 周波数資源の問題を考えてもいずれミリ波利用が本格的に進む事が予想される。ミリ波帯は, 長い電波技術・研究の歴史の中で, 軍事技術や電波天文学などの限られた特殊な分野と認識されてきた。本格的な民間利用が始まる事を考えると, 高性能化も重要ではあるがコストを無視したデバイス設計では成り立たない全く新しい産業分野が現れる可能性も考えられる。このような時代背景の中で液晶材料を眺めてみると, 分子配向状態の制御によって低電力で大きな変化量が実現できる本質的な優位性は, 電磁波の制御を考える上でも大変魅力的である。光デバイス分野で実証された小型軽量・低消費電力を特徴とする液晶デバイスの優れた性質は, 他の応用においても大いに期待できると思われる。ミリ波帯における液晶デバイス応用において, 何らかの高周波回路に液晶材料を集積化する手法は, 小型化の点で極めて有用である。特に平板型の回路に液晶を導入する場合, サンドイッチ型のセル構造を用いる事が容易であり, 液晶ディスプレイで蓄積されたデバイス作製の基礎技術をそのまま利用できる可能性があるため, 多くの研究者がこの手法に注目して精力的に研究を進めている。一方, 立体回路の中で大きな実績を有する導波管は, ミリ波帯ではかなり小型になるため液晶デバイス応用形態の一候補として大いに期待できるものと思われる。このような考えから導波管に液晶材料を封入した単純な構造を有する位相変調器の可能性について検討してきた。このとき, 導波管内部へ導入した液晶の適当な駆動方法の開発が大きな課題となるが, 本研究では導波管外部から電磁石を用いて磁界を印加する磁界駆動型のミリ波位相変調器を用いて検討を行った。

**キーワード:** 液晶, ミリ波, 導波管, 磁場駆動

1970年代に低損失光ファイバーと室温動作のレーザーダイオードが開発され, 高速情報通信の基盤技術がマイクロ波から一気に光の周波数までジャンプした。その結果, 光と電波(マイクロ波)の間には未開拓の周波数帯がしばらく残される事になったが, 1990年代に超短パルスレーザーの開発を核とする新しいTHz波光源の登場によって, ミリ波帯も含めた取り残された周波数領域が大きく注目されるようになった。ミリ波は古くから軍事技術に利用され, 学術的な応用も天文学やプラズマ計測が挙げられる

程度で, 一般の技術者は立ち入れない特殊な分野という印象があった。しかし, 前述のTHz波ファイバーと共に未開拓な電磁波領域の一部として新しい期待を受けると共に, 近年の携帯情報端末の高性能化や端末数の急激な増加によりミリ波帯の民間利用が現実視されるようになってきた。既に車載用のミリ波レーダーは多くの車で採用が進んでいる。衝突防止レーダー応用のみがターゲットであれば, レーザーを用いたものやカメラを用いたものも優れた性能を示しているが, 今後車載用の超高速無線通信機器

との融合を考えるとミリ波の利用は大きなメリットが期待される。

さて、ミリ波のような高い周波数帯の電磁波は直進性が強く現れる領域であり、小型アンテナでビーム状に取り回せるため省電力化、情報セキュリティの面で優れていると言われている。しかし一方で、このような特徴を生かすためにはビームを自由に操る扱い易いミリ波制御デバイスが不可欠となる。半導体を初めとする様々な制御デバイスが提案されているが、ディスプレイ応用で実績があり優れた電気光学材料として広く知られている液晶材料のミリ波制御デバイス応用も大きな期待が持たれる。このような考えから、様々なアプローチによる液晶ミリ波デバイスの実現に向けた取り組みが行われている。中でも、フェーズドアレイアンテナのようなビームステアリングデバイスを実現する為には優れた位相変調器の開発が重要となる。

これまで、平板型の優れた高周波回路として知られているマイクロストリップラインを用いたもの (Ito et al, 2012) (Nose et al, 2013) (能勢ら, 2015, 2016), コプレーナ線路を用いたもの (Ito et al, 2011), 導波管を用いたもの (Nose et al, 2018) などが提案されている。平板回路型の場合、ディスプレイと同じサンドイッチ型のセル構造を用いる事ができ、電極構造をうまく設計すれば薄型のデバイスを実現する事も可能になる。一方、導波管を用いる場合は低損失で信頼性の高いデバイスが期待できるが、使用周波数でサイズが決まってしまう、ミリ波帯では小型になるとは言え通常の液晶デバイスの感覚からすると桁違いに巨大な液晶デバイスを実現しなくてはならない。さらに、そのような巨大セル構造内に閉じ込められた液晶分子の配向制御法の開発が大きな課題になるが、金属で覆われたセル構造を考えると磁場による駆動が最も簡便な方法と思われる。本研究では、二組の電磁石を直角に組み合わせた四極電磁石を用いて導波管型液晶デバイスを駆動する方法について基礎的な検討を行った。

### 四極電磁石の特性と駆動方法

図 1 に、実験に用いた電磁石システムの構成を示

す。X および Y 方向に設置した電磁石ペアは独立に磁場を制御できるようになっている。導波管は U バンド (WR-19) の矩形導波管を断面の長手方向が y 軸に平行になるように設置している。このとき、導波管を伝搬する基本モードのミリ波電界は x 方向となるため、x 方向の磁場を印加すると  $n_e$ , y 方向で  $n_o$  を感じる事になる。したがって、磁場の方向を制御する事によって、これらの中で連続的にミリ波の感じる屈折率を制御する事ができる。

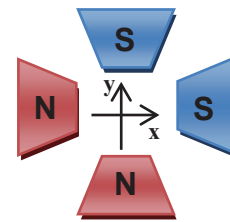


図 1 四極電磁石の構成

図 2 (a) および (b) に x 方向の電磁石のみに電流を流して x 方向の磁場強度の x および y 方向の分布を測定した結果を示す。観測される磁場は、ほぼ x 方向成分のみであるが、その強度は y 方向のポールピースの存在によって大きく変化している様子が分かる。x 方向では中央が最も弱く、y 方向には中央が最大となるような強度分布が現れる。また、y 方向の電磁石を励起した場合はこれらが逆転する。z 方向にはこの範囲ではほぼ均一な分布となっている事から、導波管の断面サイズを考えると中央部に正確に設置する事により所望の磁場で駆動する事が可能と思われる。

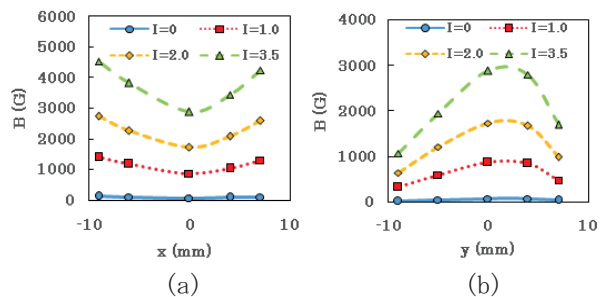


図 2 四極ポールピース内での磁場強度分布特性

図 3 (a) に、x および y 方向の電磁石の電流を制御信号に対して正弦波状および余弦波状に変調した

駆動によって得られる x および y 方向の磁場の大きさ（磁束密度）を測定した結果を示す．電磁石で発生する磁場は電流に比例するため，x および y 方向の磁場成分が正弦波および余弦波状に変化する事が確認できる．これらを基に，磁場の大きさと方向を計算した結果を図 3 (b) に示す．磁場の大きさはほぼ一定で，方向のみが 90°変化している事が分る．これをベクトル磁場駆動とよぶ事にする．

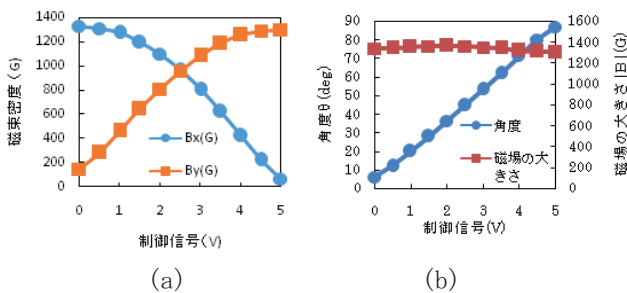


図3 正弦波変調による磁場強度の変化特性

### ミリ波透過特性の評価

図 4 は，x 方向の磁場強度をリニアに変化させて液晶を駆動した場合に導波管を伝搬するミリ波の透過位相および振幅を測定した結果を示す．しきい特性は見られず，磁界印加と共に徐々に変化して 0.1T（1000G）程度でほぼ一定になる事が分る．一方，振幅の変化を見ると透過率が上昇しており，液晶の損失が小さくなった事を示している．ここでは，x 方向の電磁石を励起しており，ミリ波電界が  $n_c$  値を感じるように変化する事に対応したミリ波透過特性の変化になっている．

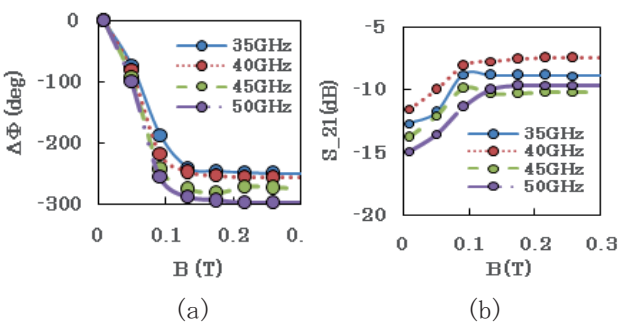


図4 磁場強度変化による透過ミリ波の位相および透過振幅の変化特性

図 3 に示したベクトル磁場駆動法によって液晶の駆動を行った場合の透過ミリ波の位相変化および振幅の変化を測定した結果を図 5 に示す．ここでは，x 軸方向を 0°として磁場の方向を y 軸方向の 90°まで変化させているため，位相の変化方向（符号）が図 4 とは逆になっているが，変化の絶対値は基本的には同じである．0°から 90°まで位相が連続的に変化している事が分る．このとき液晶分子の配向方向は磁場の方向に追従しているものと考えられ，分子配向角と位相の変化は直線的ではない為，グラフの変化も直線的な変化にはなっていない．しかし，ある程度の大きさの磁場を印加すれば分子配向方向を自由に制御できる事が確認された事から，液晶分子配向と屈折率変化の理論的關係から位相変化を線形化する駆動を行う事はそれほど難しくないと思われる．

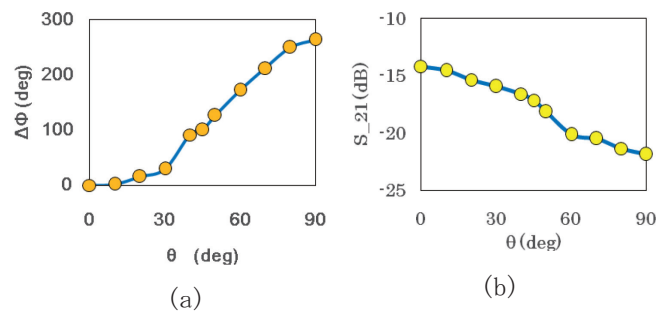


図5 ベクトル磁場駆動によるミリ波の位相および透過振幅の変化特性

また，図 4 における測定では磁場変化に対する応答速度を考慮して，磁場変化の 1 分後のデータを測定した．大形の液晶セルを駆動した場合，十分大きな磁場を印加しても分単位の応答時間が必要である．また，0.3T の最大磁場印加後に磁場を 0 に戻しても位相の値が数分程度内で変化の様子は見られなかった．一方，図 5 に示したベクトル駆動では磁場変化に対して，手作業の測定に対してはリアルタイムでデータの収集が可能であった．位相の変化を戻す場合も磁場の方向を 90°から 0°に戻す駆動になるため応答の速さは変わらない．

## まとめ

矩形導波管をセル構造として用いた超大形液晶位相変調器の駆動について四極の電磁石を用いるベクトル磁場駆動について検討した。四つのポールピース間では、お互いの磁極の存在によって磁場強度の不均一な分布が生じるが、ミリ波導波管程度の大きさであれば大きな問題にはならないと思われる。0.1T程度の磁場強度で液晶分子の配向が飽和する事から、磁場強度を0.13Tに保ちながら磁場方向のみを変化させるベクトル磁場駆動を行い、通常の磁場強度変化による駆動法との比較を行った。その結果、少なくとも数秒程度の変化に追従して位相が変化の様子が観察された。単純な磁場強度変化では分オーダーの応答時間が必要になると共に、磁場をOFFしてもその値にしばらく固定されたまま変化しなくなる事を考慮すると、全く異なる駆動特性が得られているもと考えられる。

## 謝辞

本研究の一部は、学長プロジェクト「産学共同研究推進事業」およびJSPS研究費(15K06025)の助成により行われた。

## 文献

Ryouta Ito, Takayuki Kawakami, Yusuke Ito, Takayuki Sasamori, Yoji Isota, Michinori Honma, and Toshiaki Nose (2012). Fundamental Properties of Novel Design Microstrip Line Type of Liquid Crystal Phase Shifter in Microwave Region. *Jpn. J. Appl. Phys.* 51, 044104.

Toshiaki Nose, Liang-Chy Chien, Otilia Catanescu, Andrii Golvin, Yusuke Ito, Takayuki Sasamori, Yoji Isota, Ryouta Ito, and Michinori Honma (2013). Improved High-Frequency Performance of Microstrip-Line-Type Liquid Crystal Phase Shifter. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 52, 091701.

能勢敏明, 永澤雅, 渡辺猛, 伊藤謙二, 伊東良太, 本間道則 (2015). 「n形液晶を用いたミリ波位

相変調器の検討」『秋田県立大学ウェブジャーナル』B, 2, 194-198.

能勢敏明, 永澤雅, 真坂護, 伊藤謙二, 伊東良太, 本間道則 (2016). 「液晶ミリ波位相変調器を組み合わせたツインアレイアンテナシステムの基礎特性」『秋田県立大学ウェブジャーナル』B, 3, 167-173.

Ryota Ito, Susumu Yanagihara, Kenji Ito, Takeshi Watanabe, Toshiaki Nose, and Michinori Honma (2011). Basic Performance of Refractive Index Measurement Method for LC Materials in Super High Frequency Region by Using Coplanar Wave Guide. *MCLC*, Vol.543, 92-100.

Toshiaki Nose, Ryota Ito, and Michinori Honma (2018). Basic Performance of Rectangular Waveguide Type LC Phase Shifter Driven by Magnetic Field, *IRMMW2019*, Mo-POS-46.

〔 2019年6月30日受付 〕  
〔 2019年7月9日受理 〕

## Driving Performance of a Waveguide Type Liquid-Crystal Millimeter-Wave Control Device Using a Magnetic Field

Toshiaki Nose<sup>1</sup>, Kenta Kunii<sup>1</sup>, Mamoru Masaka<sup>2</sup>, Kenji Ito<sup>2</sup>,  
Ryota Ito<sup>1</sup>, and Michinori Honma<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Department of Intelligent Mechatronics, Faculty of Systems Science and Technology, Akita Prefectural University*

<sup>2</sup> *Yurikogyo Co. Ltd.*

The next generation of high speed wireless communication service called 5G was launched at the beginning of April. As the service spreads across the world, the use of millimeter-waves (MMW) will become mandatory. Although ICT gathers much attention these days, such as IoT, self-driving cars, AI, smart-agriculture, it is not widely recognized that the most important base technology is high-speed wireless communication for all new ICTs. Now, 5G is expected to generate new commercial opportunities beyond the limitations of smart phones due to the significant improvement in specifications compared to the other generation changes so far. However, the depletion of frequency resources of available electromagnetic-waves due to the abrupt increase in the number of wireless terminals represented by smart phones remains a concern. Therefore, the usage of MMW which has remained unexplored is now open for general consumer services. We are expecting a new application field of liquid crystal (LC) materials to control MMW because superior electro-optic properties are also expected in the MMW region due to the large birefringence. Generally, planar type high frequency circuits are adopted because they are easily introduced into a sandwich cell structure which has a thinner LC layer. However, hollow waveguides are also attractive if we consider their low loss properties and high reliability, although LC volume would remain huge if LC materials were introduced, while the waveguide would become smaller in the MMW region. The greatest difficulty with a bulky LC cell is how to drive it. Here, we adopted a magnetic field to drive LC molecules confined in the metal hollow cell structure. Two pairs of electromagnets were used for the versatile control of LCs to overcome the fatal degradation of recovery speed, which is generally biggest problem with bulky LC cells. We called this driving method the “vector magnetic field drive,” and its basic performance was investigated.

**Keywords:** Liquid crystal, Millimeter wave, Wave guide, Magnetic field drive