

## n 形液晶を用いたミリ波位相変調器の検討

能勢敏明<sup>1</sup>, 永澤雅<sup>1</sup>, 渡辺猛<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電子情報システム学科<sup>2</sup> 由利工業株式会社

最近の携帯端末等の急激な普及とそれらの機器における継続的な性能向上により、必要とされる通信容量が常に技術の進歩を上回り、利用周波数帯がひっ迫する状況が続いている。そこで、これまであまり使われて来なかったミリ波帯の利用が大きな期待を集めている。このような高い周波数帯の電磁波は直進性が強く現れるため、電波の伝搬を小型アンテナでビーム状に取り回す事が容易になる。従って、相手に向かって必要最低限の電力で通信する省エネ化が可能となり、これは情報セキュリティの点でも有利と考えられる。しかし一方で、通信相手との間で安定な通信を確保するためには、伝搬ビームを高精度に制御するビームステアリングデバイス等の何らかの制御デバイスが不可欠となる。ところで、液晶材料は光波領域における優れた電気光学材料として知られているが、最近ミリ波領域でも大きな複屈折特性を持っている事が分ってきた事から、ミリ波帯の制御デバイス応用も期待されている。そこで本研究では、電波の高速なビームステアリング装置として良く知られているフェーズドアレイアンテナシステムを最終目標に、そのキーデバイスとなる位相変調器を液晶を用いて実現する事を目指している。ここでは、通常の p 形液晶材料を用いた位相変調器と組み合わせた相補的な動作システムを構成するために必要となる、n 形液晶材料を用いた位相変調器の基礎特性を調べた結果について述べる。

**キーワード:** 液晶, ミリ波, 位相変調器, ビームステアリング, 制御デバイス, 液晶ミリ波応用

近年の携帯端末の性能向上と普及の急増により、情報通信量が年間 2 倍のスピードで増加しており、10 年後には現在の 1000 倍の通信速度を実現する新しい技術が必要となる事が予想されている。このような状況の中で、次世代の通信インフラはマイクロセル化が不可欠と考えられており、ミリ波帯の利用が大きな期待を集めている。直進性が強く現れるこのような高い周波数帯は、小型アンテナで簡単にビーム状に伝搬させる事ができ、省電力、高い情報セキュリティの観点からも有利になる。しかし一方で、このような使い方をする場合には、ビームを自在に取り回す何らかの制御デバイスが不可欠となる。

電波の制御法として、例えばレーダー装置のように、アンテナを機械的に動かす方法は良く知られて

いるが、省エネ、高速性の点からも電子的な動作による制御法が望まれるところである。液晶材料は光波を制御する為の優れた材料として知られているが、最近の研究でミリ波や THz 領域の電磁波に対しても大きな複屈折を有する事が明らかになって来ており、液晶を用いたミリ波制御デバイス応用が検討されている。小型化の観点から、平板回路に液晶を組み込んだフェーズドアレイシステムは極めて有用と考えられ、その実現に向けて筆者らもキーデバイスとなる液晶ミリ波位相変調器の研究を行ってきた。(能勢ら, 2012)

これまで、p 形液晶を用いた位相変調器の検討を行ってきたが、相補的な動作によって共通の駆動回路で可変範囲を拡大する事を考えた場合、n 形液晶

による位相変調器との組合せが有用と考えられる。そこで本研究では、n形液晶を用いたミリ波位相変調器の基本動作を検証すると共に、非対称な電極構造によって生じる電界分布によるn形液晶の分子配向効果について考察を行った結果について述べる。

### 液晶分子配向状態の観察

図1に、ツインアンテナアレイシステムの概形を示す。色付と白抜のアンテナパターン電極は、それぞれ誘電体基板の裏と表に形成されている。ミリ波は、位相変調器A,Bを通してアンテナに給電され、適当な位相変調を行う事によって、ビームの伝搬方向を左右に変化させる事ができる。このとき、二つの位相変調器を独立に駆動して制御する方法も考えられるが、ここではp形とn形の液晶材料を組み合わせた相補的な動作により共通な駆動回路によって動作するシステムの実現を目指している。

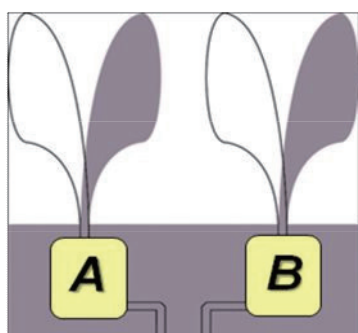


図1 アンテナアレイシステム

図2に、液晶位相変調器の構造を示す。両端は、平板型の高周波回路として良く使われているマイクロストリップライン(MSL)である。中央部の基板上部に厚さ 200 $\mu\text{m}$  の液晶層を集積化して位相変調器を構成している。このとき、MSLの誘電体内部を伝搬して来たミリ波を、上部の液晶層へ導くための特殊な変換回路が必要となる。ここでは、スルーホールを介して下面グランド電極と最上面のグランド電極とを接続する事により、中央部に反転型のMSL構造を形成する為の独自の変換回路を用いている。この構造により、MSL回路の一部に液晶層を容易に集積化する事が可能になっている。

図3に、p形液晶とn形液晶の駆動電界に対する

分子配向応答の違いを示す。液晶の駆動は、通常数十～数百 Hz 程度の低周波が使われており、p形液晶はこの交流電界に対して分子長軸方向に分極が発生するために、細長い液晶分子が駆動電界に平行に配向する性質を持っている。一方、分子構造の工夫によって分極が分子軸に垂直な方向に生じるものがあり、この場合は電界に垂直に配向するトルクが生じる事からn形液晶と呼ばれている。しかしこのとき、分子長軸の方向は電界に垂直な面内で無限の自由度があるため、電界の力だけでは一義的に配向方向が決定されない点がp形液晶との大きな違いであり、実際にどのような分子配向状態を取るか詳細に調べておく必要がある。

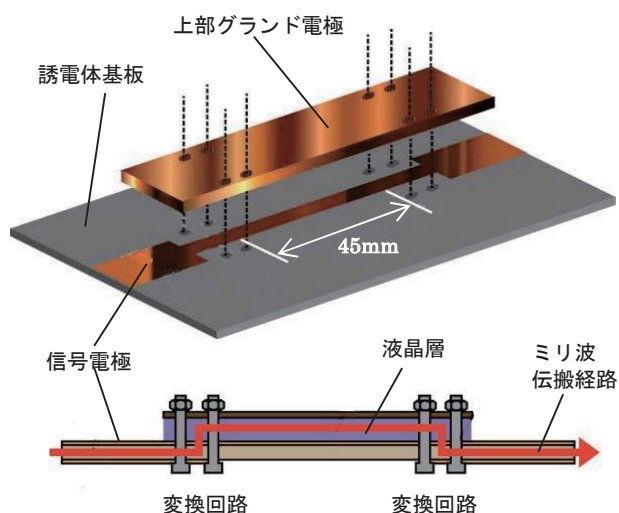


図2 液晶ミリ波位相変調器の構造

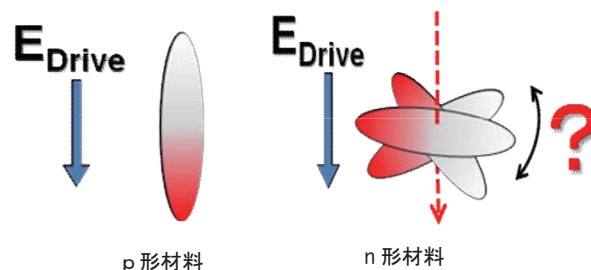


図3 液晶分子の電界応答

液晶の分子配向状態を調べるスタンダードな方法として、偏光顕微鏡観察がある。しかし、実際の位相変調器は誘電体基板と銅箔電極でサンドイッチされており内部の状態を光学的に観察する事は不可能

である．そこで，全く同じ電極構造を有する液晶セルを ITO 透明電極を塗布したガラス基板を用いて作製し，内部の様子を偏光顕微鏡を用いて観察した結果を図 4 に示す．

0V では，液晶分子配向が初期配向状態のまま基板全面で垂直になっているため，ほぼ一様に暗い状態となっている．電界印加と共に，電界の強い MSL 信号線のエッジ付近から分子が動き初め，それと共に生じる複屈折のため，動きのある部分から徐々に干渉縞が現れる．このようにして，各電圧における干渉縞の本数などから液晶分子の動きの様子を推測する事ができる．図 4 を見ると，2V 程度までは MSL の信号線部分(上下に電極がある部分)だけで動作しているが，電圧が高くなると両側の下部グランド電極のみがある部分へ動きが広がって行く様子が見られる．偏光板の方向と信号電極を平行にして観察した結果を踏まえると，電極エッジの電界方向に対してややねじれる配向が生じているものと思われる．4V の観察結果を見ると中央に細い線が見え，左右の分子配向方向の違いから中央部に配向欠陥が生じている事を示唆している．面内でややねじれる配向状態が生じているのも，中央の欠陥の発生が影響しているものと思われる．

これらの観察結果から，中央の欠陥はデバイス動作の劣化を生む可能性もあるが，MSL 信号電極エッジの斜め電界によって，左右が対称に配向する分子配向状態が再現性良く生じている事を裏付けている．従って，完全に基板に垂直な電界を印加した場合に生じるようなランダムな分子配向状態は生じていない事が分かった．

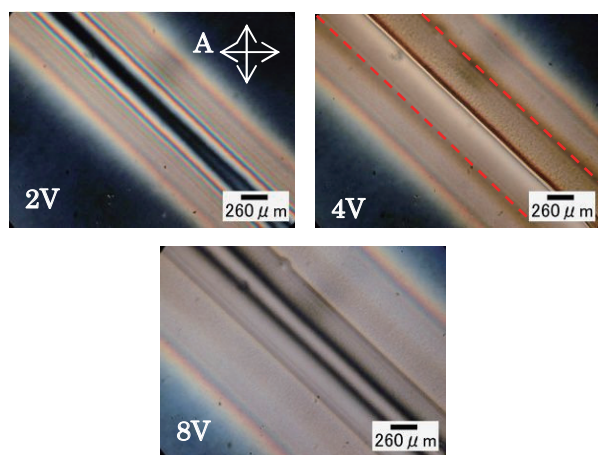


図 4 偏光顕微鏡による分子配向の観察

### ミリ波の位相変調特性

図 5 に，n 形液晶を用いて作製した位相変調器のミリ波透過特性，および 8V(20Hz)の駆動電圧印加による位相変化特性を調べた結果を示す．周波数と共に透過損失が大きくなる様子が見られ，ミリ波帯では 20dB 程度の損失となっている．実用上はまだ大きな値であるが，この値は典型的な p 形液晶と同程度の値である．

一方位相変化を見ると，変化の値が正の値を示しており，p 形液晶とは逆の位相変化が生じている事が確認できる．20GHz 付近にピークが生じているものの，ほぼ周波数に対して直線的な位相変化を生じており，広帯域な変調特性が得られている．しかし，位相変化量は，材料特性から期待される値に比べると小さな値しか得られていない事も分かった．

表 1 に，導波管測定セルを用いて 50GHz 帯で測定した液晶材料の屈折率と損失の測定結果を示す．典型的な p 形の液晶材料として K15 の値も併記している．損失は，K15 に比べてやや大きいもののほぼ同レベルであり，図 5 の透過特性の測定結果をほぼ示唆しているものと考えられる．

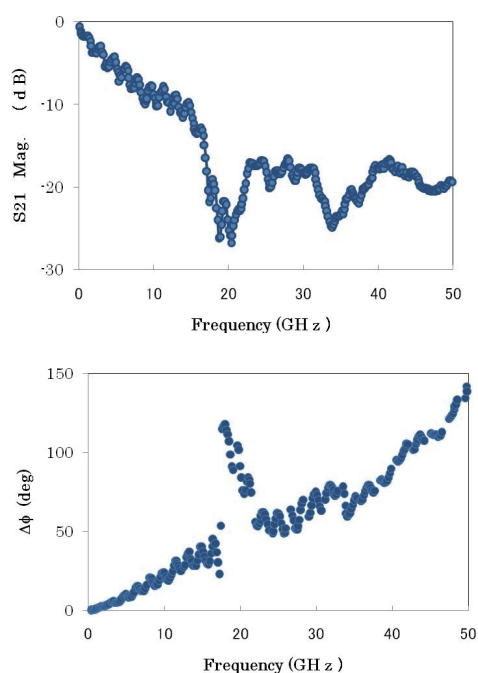


図 5 透過振幅および位相変調特性

屈折率については、可視光に比べて  $n_o$  がほぼ同程度なのに対して  $n_e$  が低下するため、複屈折  $\Delta n$  がややミリ波帯で低下してしまう傾向は p 形と同様である。p 形液晶と材料特性がそれほど違わないにも関わらず、位相変調特性が大幅に低下する理由は、駆動電界に対する分子配向の応答が大幅に異なる事が考えられる。しかし、図4の偏光顕微鏡観察の結果からすると、中央部の分子配向欠陥の発生による可変量の低下も予想されるが、実際にはそれだけで説明できない大幅な減少が起こっているように思われる。正しい理解のためには、今後 n 形液晶材料の不均一な電界に対する応答についての詳細な検討が必要になると思われる。

表1 導波管法による液晶材料の評価

	50GHz		可視光	
	b-Type	K15	n-Type	K15
$n_e$	1.63	1.71	1.72	1.74
$n_o$	1.52	1.62	1.51	1.53
$\Delta n$	0.11	0.09	0.21	0.21
$\alpha_e (\text{mm}^{-1})$	0.023	0.019		
$\alpha_o (\text{mm}^{-1})$	0.038	0.036		
$\Delta \alpha (\text{mm}^{-1})$	-0.015	-0.017		

### まとめ

機械的な動作を必要としないミリ波用のビームステアリングデバイスの実現を目指して、液晶材料を用いたミリ波位相変調器の開発を行っている。これまで p 形液晶を用いた検討のみを行って来たが、本研究ではツイーンアンテナアレイを駆動する際に、相補的な動作をする n 形液晶を用いた位相変調器の基礎特性を調べた。

位相変調器の透過損失は、材料特性から予想される程度であり p 形液晶材料とほぼ同程度の値であった。また、位相変調特性に関しては、印加電圧に対して p 形液晶とは逆の位相変化を生じる事が確認され、共通の駆動回路によって相補的な動作が行える

事を検証した。一方で、複屈折自体は p 形材料と同程度の値を有しているにも関わらず、位相の変化量は大幅に低下する事も明らかになった。

そこで、内部の分子配向状態を調べるために、透明な液晶セルを ITO ガラスを用いて作製し偏光顕微鏡による観察を行ったところ、MSL 信号電極中央部に分子配向欠陥が生じている事が明らかになった。しかし一方では、変調特性を大幅に低下させるようなランダムな分子配向が生じている様子は確認されなかった。

現状では、n 形液晶における電界応答の大幅な劣化の原因は明らかでは無いが、不均一な電界分布と駆動周波数等の関係により今回の偏光顕微鏡観察とは異なる分子配向状態が生じている可能性もあるため、更に詳細な検討が必要と思われる。

### 文献

T. Nose, T. Komuro, T. Sasamori, Y. Isota, T. Watanabe, K. Ito, R. Ito, and M. Honma (2014). Fundamental Performance of Liquid Crystal Millimeter-wave Phase Shifter Using Negative Dielectric Anisotropic Material. The 39<sup>th</sup> International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves.

平成 27 年 6 月 30 日受付  
平成 27 年 7 月 31 日受理

## A Liquid Crystal Millimeter-Wave Phase Shifter using n-type Liquid Crystal

Toshiaki Nose<sup>1</sup>, Masashi Nagasawa<sup>1</sup>, Takeshi Watanabe<sup>2</sup>, Kenji Ito<sup>2</sup>, Ryouta Ito<sup>1</sup>, Michinori Honma<sup>1</sup>

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

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

An n-type liquid crystal (LC) is introduced to a micro strip line (MSL) millimeter-wave phase shifter to obtain a twin-antenna phased array system, which can be complementary operated. The transmission loss of the phase shifter is comparable with that of p-type materials. However, the magnitude of the phase shift is significantly reduced even though the n-type LC has the same birefringence as the p-type LC. A transparent LC cell, which has the same electrode structure as the actual phase shifter, is fabricated using ITO glass substrates for polarized microscopy observations. There are molecular orientation defects in the middle of the MSL signal electrode owing to the symmetrical molecular orientation state under the electric field distribution. However, there is no significant degradation in the molecular orientation state to account for the phase shift degradation. Note that another unrecognized molecular orientation state may be responsible, which we will be investigating in the future.

**Keywords:** liquid crystal, millimeter-wave, phase shifter, beam steering, control device, millimeter-wave application