

テラヘルツ帯で動作する液晶デバイスの基礎特性の評価

イメージング応用へ向けた取り組み

伊東良太¹, 本間道則¹, 能勢敏明¹¹ 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

光と電波の中間に位置するテラヘルツ帯の電磁波は、発生・検出技術の進歩にともない今後利用が進むと考えられる。特に、プラスチックや紙を透過する特性や X 線に比べ安全である特徴から、新たなイメージングへの応用が期待されている。一方、液晶は液体の有する流動性と固体結晶の持つ異方性を兼ね備えた物質であり、屈折率の異方性を電場により変化させることにより、伝搬する光をコントロールすることができる。さらに近年、液晶材料がテラヘルツ帯においても屈折率異方性を示すことが明らかになっており、テラヘルツ波を制御する種々のデバイスへの応用が期待されている。そこで本研究では、テラヘルツ帯で動作する液晶デバイスを作製し、光励起テラヘルツ波気体レーザーを用いてその動作特性を評価した。その結果、作製した液晶デバイスにより 2π 以上の位相差を導入することに成功した。さらに、それらを用いて X カット水晶基板の複屈折計測を行い、2.5THz において複屈折の値を見積もった。

キーワード: テラヘルツ波, 液晶デバイス, イメージング

光と電波の間には、これまで利用が困難であった未開拓領域「テラヘルツ帯」が存在する。電磁波の利用は、発生・検出の技術の進歩と利用法の確立によって進められ、現在では、放射線から電波の領域で固有の性質を利用した画期的な応用が見出されている。テラヘルツ帯の電磁波は、周波数が 100 GHz から 10 THz (波長が 3 mm から 30 μm) 程度であるが、量子カスケードレーザーや光パラメトリック発生などの新たな発生源の出現により、今後幅広く使われることが予想される。また、テラヘルツ帯の電磁波には、プラスチック、紙、半導体など可視光では不透明な物質を透過する物質透過特性や、物質に特徴的な吸収スペクトルを示す「指紋スペクトル」など他の周波数帯には無いユニークな特徴がある。さらに、X 線に比べ安全であることも特徴として挙げられ、新たなイメージングへの応用が期待される。一方、液晶は液体の有する流動性と固体結晶の持つ

異方性を兼ね備えた物質であり、一般に細長い分子あるいは板状の分子から構成される。また、誘電率、屈折率、導電率、透磁率などの様々な性質において異方性が現れ、その値は他の物質に比べ大きい。このような性質を活かし、液晶材料はディスプレイとして幅広く用いられている。さらに近年、液晶材料がテラヘルツ帯においても屈折率異方性を示すことが明らかになっており (Nose, T., Sato, S., Mizuno, K., Bae, J. & Nozokid, T., 1997) , テラヘルツ波を制御するデバイスへの応用が期待されている。

我々はこれまで、テラヘルツ帯で動作する液晶デバイスに関する研究を行ってきた (Ito, R. et al., 2011)。また、可視光領域では、液晶を用いた位相シフト干渉システムを実現している (Nose, T. et al., 2009)。そこで本研究では、これらの実績を踏まえ、テラヘルツ帯で動作する液晶デバイスの実現とそれらを用いた複屈折計測を目指す。

方法

テラヘルツ光源

本研究では、テラヘルツ波の光源として図 1 に示す光励起テラヘルツ波気体レーザーを使用する。この光源は、励起用の CO₂ レーザーとテラヘルツ発振用のガスレーザーから構成されている。この光源では、電子のエネルギーレベルではなく分子の振動エネルギーが誘導放出に関与するため、電子速度の限界と電子の熱励起の影響により発振が困難となるテラヘルツ帯においても高出力が得られるという特徴がある。現時点において、この光源では、発振周波数 0.7~2.5 THz、最大出力数 100 mW の連続波発振が得られている。



図 1 本研究に用いたテラヘルツ波光源

液晶デバイスの構造

図 2 に本研究で作製した液晶デバイスの構造を示す。液晶は液体のような流動性を持つことから、それらを利用する場合には何らかの容器（セル）構造が必要である。一般的な液晶ディスプレイでは、2枚のガラス基板を適当な大きさの絶縁スペーサーで保ったギャップ間に液晶材料が封入された構造用いられる。可視光用のデバイスでは、ガラス基板と ITO(Indium Tin Oxide)透明電極が用いられるが、テラヘルツ波の透過率が低いため、今回は用いることができない。そこで本研究では、図 2 に示すようにテラヘルツ波の透過率が高い水晶基板と有機導電性薄膜である PEDOT/PSS によりセル構造を作製した。また、液晶デバイス内では、液晶分子の向き（配向方向）を基板表面に塗布された配向膜の表面処理によって制御可能である。本研究では、液晶ディスプレイ作製プロセスで一般的に用いられるラビング法

により配向処理を行い、図 2 に示すようにセル内で液晶分子の長軸の方向（ダイレクター）が一様に分布するホモニアス配向セルを作製した。また、液晶材料はテラヘルツ帯で比較的屈折率異方性の大きい E44 とし、液晶層の厚さは 800 μm とした。ホモニアス配向セルでは、入射する電磁波において、液晶分子の長軸に平行な方向の電界と垂直な方向の電界の位相差を電圧により制御することが可能になる。すなわち、液晶デバイスを透過した電磁波の偏光状態を電圧により制御することが可能となる。

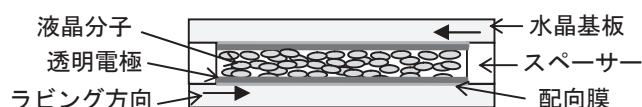


図 2 テラヘルツ帯で動作する液晶デバイスの構造

液晶デバイスを用いた複屈折計測

高精度な複屈折計測の手法として、位相シフト干渉法が挙げられる。位相シフト干渉法では入射光の位相を変えながらサンプルを通過した光を測定し、サンプルにおける位相の変化を高精度に計測することができる。また、4step による位相シフト干渉法においては、サンプルへの入射光の位相を $\pi/2, \pi, 3\pi/2, 2\pi$ と変化させて 4 通りの光強度を測定しサンプルにおける位相の変化を求める(Totzeck, M. & Tiziani, H. J., 1999)。この時の光強度 $I_1 \sim I_4$ は以下ようになる。

$$I_1 = I' + I'' \left\{ 1 - \cos \left(\delta + \frac{\pi}{2} \right) \right\} \quad (1)$$

$$I_2 = I' + I'' \{ 1 - \cos(\delta + \pi) \} \quad (2)$$

$$I_3 = I' + I'' \left\{ 1 - \cos \left(\delta + \frac{3\pi}{2} \right) \right\} \quad (3)$$

$$I_4 = I' + I'' \{ 1 - \cos(\delta + 2\pi) \} \quad (4)$$

ここで、 δ はサンプルによって生じる位相差、 I, I'' は測定系におけるノイズを示している。さらに、(1) ~ (4) 式より、

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{I_1 - I_3}{I_2 - I_4} \right) \quad (5)$$

となるため、4 つの光強度の測定結果からサンプルで生じる位相差を求めることができる。この時、ノイズによる影響がキャンセルされるため高精度な測定が可能となる。また、サンプルの複屈折を Δn 、厚

さを d , 測定波長を λ とすると,

$$\delta = \frac{2\pi\Delta nd}{\lambda} \quad (6)$$

となるため、厚さがわかっているサンプルの場合には複屈折の値を求めることができる。

この測定においては、正確な位相の変化を与える高精度な位相変調器が重要であり、我々はこれまでに、可視光領域で液晶デバイスを位相変調器として用いた位相シフト干渉法について報告してきた (Nose, T. et al., 2009). 図 3 に液晶デバイスを用いた位相シフト干渉法の実験系を示す。液晶デバイスを用いた位相シフト干渉法では、光路に液晶デバイスを挿入するだけで位相計測が可能となるため簡単な実験系で測定が行えるというメリットがある。

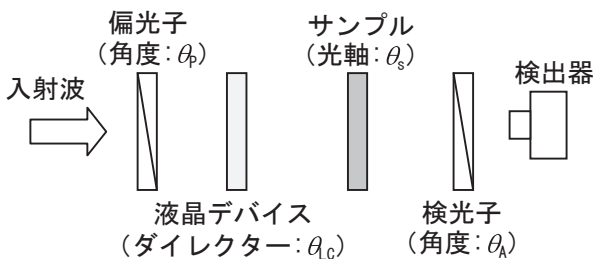


図 3 液晶デバイスを用いた位相シフト干渉法の実験系

結果と考察

テラヘルツ液晶デバイスの動作特性

テラヘルツ帯で動作する液晶デバイスの透過率の測定は、光励起テラヘルツ波気体レーザーを用いて行った。図 4 に透過率測定の実験系を示す。液晶デバイスは、液晶分子の長軸方向 (ダイレクター) が $\theta_c=0^\circ$ となるように配置した。また、液晶デバイスの前後にワイヤグリッド偏光子を配置し、その角度を $\theta_p=45^\circ$, $\theta_A=45^\circ$ とした。この配置では、液晶デバイスを透過した電磁波の偏光状態の変化を透過率の変化として観測することが可能である。

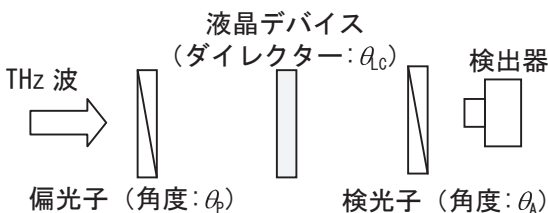


図 4 テラヘルツ液晶デバイスの透過率の測定系

図 5 にテラヘルツ液晶デバイスの印加電圧と透過率の関係を示す。この測定では、テラヘルツ波の周波数は 2.5 THz として実験を行っている。図 5 では、電圧の増加により透過率が変化していることがわかる。これは、液晶デバイスに印加した電圧により液晶分子の配向変化が起こり、それにともない液晶デバイス透過後のテラヘルツ波の偏光状態が変化していることを示している。さらに、図 5 の透過率は、37 V 付近で最小値をとった後に増加し、43 V 付近で最大値をとり、再び減少していることがわかる。このときの液晶分子の長軸に平行な方向の電界と垂直な方向の電界の位相差について考えると、電圧が高い部分を基準とした場合、37 V 付近で 2π の位相差がついていると考えられる。しかし、液晶材料の吸収の影響により透過率の値が電圧の上昇とともに下がっていく傾向がみられ、テラヘルツ帯で動作する液晶デバイスの高性能化に向けては、テラヘルツ帯で吸収の少ない液晶材料の開発も一つの課題であると考えられる。以上の結果から、吸収による影響はみられるものの、本研究で作製した液晶デバイスにより、2.5 THz の電磁波に対して 2π 以上の位相差を与えることができると考えられる。

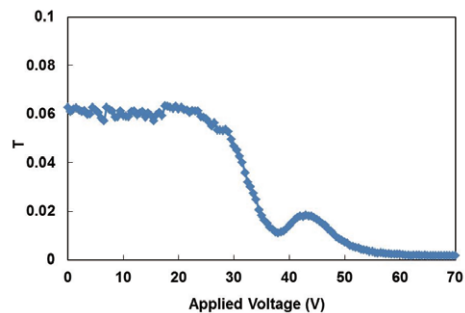


図 5 テラヘルツ用液晶デバイスの印加電圧と透過率の関係

テラヘルツ帯における水晶基板の複屈折計測

液晶デバイスを用いて、2.5 THz の電磁波に対して 2π 以上の位相差を与えることが可能となったため、それらを用いて、位相シフト干渉法による複屈折の計測を試みた。テラヘルツ帯では、液晶材料の吸収があるため、4step 法の透過光の強度 $I_{\text{THz1}} \sim I_{\text{THz4}}$ は次のようになる (Ito, R., Takahashi, T., Honma, M. &

Nose, T. 2015).

$$I_{THz1} = \alpha_{LC1} \{I' + I''(1 + \sin \delta)\} \quad (7)$$

$$I_{THz2} = \alpha_{LC2} \{I' + I''(1 + \cos \delta)\} \quad (8)$$

$$I_{THz3} = \alpha_{LC3} \{I' + I''(1 - \sin \delta)\} \quad (9)$$

$$I_{THz4} = \alpha_{LC2} \{I' + I''(1 - \cos \delta)\} \quad (10)$$

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{I_{THz1}}{\alpha_{LC1}} - \frac{I_{THz3}}{\alpha_{LC3}}}{\frac{I_{THz2}}{\alpha_{LC2}} - \frac{I_{THz4}}{\alpha_{LC1}}} \right) \quad (11)$$

ここで、 $\alpha_{LC1} \sim \alpha_{LC4}$ はそれぞれの位相差を与えた場合の液晶デバイスにおける損失の値を示している。可視光領域では液晶デバイスの損失が無視できるほど小さいため複屈折の計測に影響を及ぼさないが、テラヘルツ帯においては、この損失の値を考慮する必要がある。

図6にXカット水晶基板を導入して測定した液晶デバイスの印加電圧と透過率の関係を示す。この測定では、図3のサンプルの位置に厚さ500 μm のXカット水晶基板を挿入して2.5 THzのテラヘルツ波の透過率を測定した。このとき、 $\theta_c = 0^\circ$, $\theta_p = 45^\circ$, $\theta_A = 45^\circ$ として、Xカット水晶基板の光軸を $\theta_s = 0^\circ$, 90° としている。

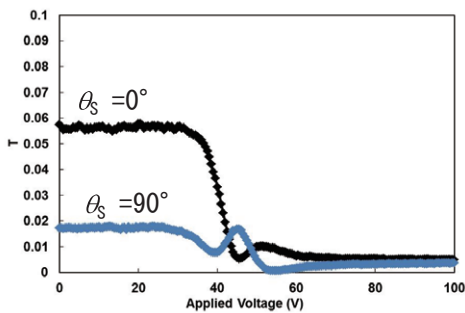


図6 X カット水晶基板を導入して測定した液晶デバイスの印加電圧と透過率の関係

また、図6の結果から計算したXカット水晶基板の位相差と複屈折の値を表1に示す。ここでは、液晶の位相差が $\pi/2, \pi, 3\pi/2, 2\pi$ となる場合の透過率から(11)を用いて位相差 δ を計算した。また、液晶の損失は、 $\alpha_{LC1} = 60 \text{ cm}^{-1}$, $\alpha_{LC2} = 50 \text{ cm}^{-1}$, $\alpha_{LC3} = 40 \text{ cm}^{-1}$, $\alpha_{LC4} = 30 \text{ cm}^{-1}$ としている。表1ではXカット水晶基板を90度回転することで複屈折の値が正の値から負の値へと変化しているが、この点は予想される結果と矛盾

していない。また、THz時間領域分光法により求めたXカット水晶基板の2.5 THzでの複屈折の値は0.06であった。この値と比較すると表1の結果は複屈折が低くなっているが、水晶の複屈折としては妥当な値であると考えられる。今後、測定精度の向上に対する取り組みが必要であると考えられるが、この手法はテラヘルツ帯での複屈折測定法として有効であると考えられる。

表1 測定により得られたXカット水晶基板の複屈折

	$\theta_s = 0^\circ$	$\theta_s = 90^\circ$
δ (rad)	0.711	-1.057
Δn	0.0266	-0.0396

文献

Nose, T., Sato, S., Mizuno, K., Bae, J. & Nozokido, T. (1997). Refractive index of nematic liquid crystals in the submillimeter wave region. *Appl. Opt.* 36(25) 6383-6387.

Ito, R., Kumagai, T., Yoshida, H., Takeya, K., Ozaki, M., Tonouchi, M., & Nose, T. (2011). THz Nematic Liquid Crystal Devices Using Stacked Membrane Film Layers. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 543(1) 77-84.

Nose, T., Terui, Y., Mizumoto, M., Okano, K., Muraguchi, H., Ozaki, N., Ito, R., & Honma, M. (2009). Microscopic birefringence imaging by phase-shift interferometry using a liquid crystal phase shifter, *Proc. of SPIE.* 7414. 741408.

Totzeck, M. & Tiziani, H. J. (1999). Phase-shifting polarization interferometry for microstructure linewidth measurement. *Opt. Lett.* 24(5). 294-296.

Ito, R., Takahashi, T., Honma, M., & Nose, T. (2015). Introduction of liquid crystal device into THz phase imaging *Proc. SPIE.* 9362. 93620K.

〔平成27年6月30日受付〕
〔平成27年7月71日受理〕

Fundamental study of liquid crystal device in the terahertz frequency region Toward imaging applications

Ryota Ito¹, Michinori Honma¹, Toshiaki Nose¹

¹ *Department of Electronics and Information Systems, Faculty of Systems Science and Technology, Akita Prefectural University*

The terahertz region of electromagnetic wave spectra ranges from 0.1 to 10 THz. In recent years, there have been extensive efforts to develop high-performance terahertz cameras and use terahertz imaging in biological and industrial applications. Liquid crystals are one of the excellent materials used in control devices for achieving low power consumption and high-speed operation. Currently, there is extensive research on the refractive indices and transmission losses of liquid crystal materials in the terahertz region of electromagnetic spectra. Liquid crystal materials show relatively large refractive index anisotropy and have potential application in some control devices. In this study, we investigate a new terahertz imaging system by using a high-power terahertz source and liquid crystal device. We fabricated an electrically tunable liquid crystal phase shifter and measured its fundamental phase-shifting properties using an optically pumped gas laser system that can generate continuous terahertz waves. We investigated the performance of the liquid crystal phase shifter using phase-shifting interferometry, which was based on a four-step phase-shifting algorithm. We also estimated the birefringence of X-cut single-crystal quartz at 2.5 THz.

Keywords: Terahertz wave, liquid crystal device, imaging