

令和5年度第2回あきた産学官交流プラザ

2024年3月4日
オンライン

液晶デバイスを用いたテラヘルツ帯での 位相計測技術の開発とその応用

秋田県立大学
システム科学技術学部

伊東良太











1

発表内容


- 自己紹介
- 研究内容の紹介
- 液晶デバイスを用いたTHz帯での位相計測
- 開発した技術の応用展開
- まとめ

2

研究内容 ～THz波の実用化に向けた研究～

4G通信		5G通信		Beyond 5G/6G							
周波数	100MHz	1GHz	10GHz	100GHz	1THz	10THz	100THz	1PHz	10PHz	100PHz	
											
	電波			THz波の特徴			光				
				物質透過特性							
				物質識別特性							
				非侵襲性							
波長	3m	30cm	3cm	3mm	300μm	30μm	3μm	300nm	30nm	3nm	

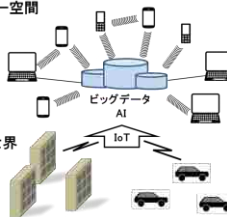
新たなイメージング応用



Optics Express 11, 2549-2554, 2003
封筒内の覚醒剤や鎮痛剤のTHz波イメージング像

薬の非破壊での成分分析
CFRPなどの非破壊での検査

次世代無線通信への応用



Beyond 5G/6G
「100Gbps」
「0.1ミリ秒程度の遅延」
「1000万台/km²の接続器数」


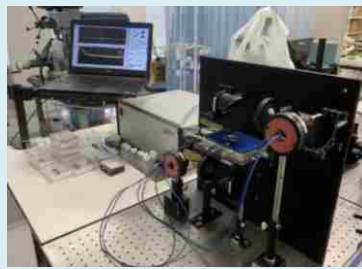
5Gと比較して10倍の性能向上が見込まれる

完全自動運転、遠隔手術、空飛ぶ車などが十分可能になる性能

3

秋田県立大学のTHz光源

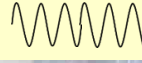

パルス光源

THz時間領域分光測定 (0.1～4THz)

- 強度と位相がのデータが得られる
- 市販の光源が大幅に増え、多くの研究で使われている
- 測定とデータ処理に時間がかかる

連続波発振光源

光励起型サブミリ波レーザー (0.6, 1.4, 2.5THz)

- リアルタイムでS/Nの高い計測が可能である。
- 半導体ベースの光源の開発が進み、今後大幅な小型化も期待される
- 現在は強度のみの測定がメイン

複数のTHz光源を同時に利用可能な研究機関は世界的にも少ないため、他の研究グループとは一線を画したアプローチが可能である

4

THz帯で動作する液晶デバイスの開発

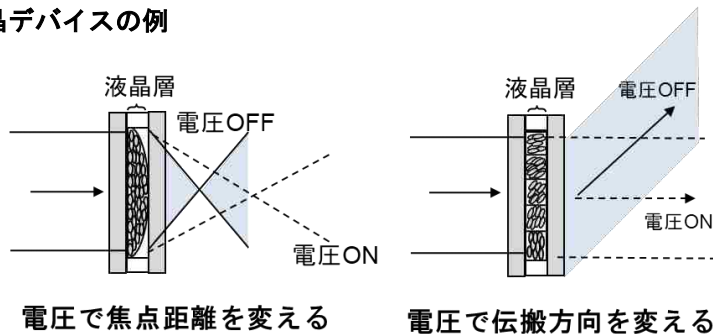
液晶デバイスの特徴

- 低電圧で屈折率を変えられる
- 低消費電力である
- 薄型・軽量で耐久性が高い



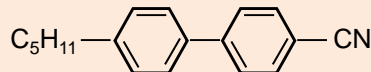
シャープのVR用ヘッドマウントディスプレイ

液晶デバイスの例



THz帯での液晶デバイスの課題

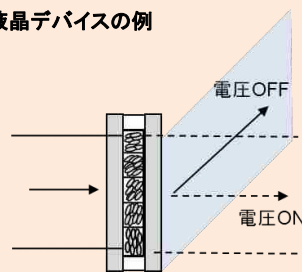
液晶材料の例:5CB液晶



テラヘルツ帯での液晶に関する報告例

Group	LC	α_o (cm^{-1})	α_e (cm^{-1})	$\Delta\alpha$	n_o	n_e	Δn
Nose et al.	5CB	40.4	16.9	23.5	2.115	2.28	0.165
Koch et al.	1825	13.7	19.0	5.3	1.540	1.911	0.371

液晶デバイスの例



電圧で伝搬方向を変える

- 課題1** 短軸と長軸で吸収係数が異なる
⇒電圧ON/OFFでの強度に差が出る、透過波が歪むなど
- 課題2** 屈折率の変調量 Δn が小さい
⇒電圧ON/OFFでの変調量が減る
- 課題3** 電圧ON/OFFでの応答速度が遅い
⇒可視光用ミリ秒に対し、THz用では分のオーダー
- 課題4** 吸収の値が大きい
⇒デバイスの効率が悪い

近年の研究内容と成果

A 液晶材料の開発

2020～2023 科研費

課題1、2を解決

A1. 短軸と長軸で吸収係数が同じ液晶の発見 R. Ito, *et al.*, Appl. Sci. 8(12), 2478, pp.1-8, (2018).

A2. 短軸と長軸で吸収係数が同じかつ、 Δn の大きい液晶の発見

R. Ito, *et al.*, IEICE TRANS. ELECTRON., E105-C, (2), 68-71 (2022).

B 液晶デバイスの開発

B1. 波形の歪まない液晶位相制御デバイスの開発 R. Ito, *et al.*, Appl. Sci. 8(12), 2478, pp.1-8, (2018).

B2. 波形の歪まない液晶偏光回転デバイスの開発 R. Ito, *et al.*, Appl. Opt. 62(15) 4052-4059 (2023).

C 液晶デバイスの利用に関する研究

C1. 液晶デバイスを用いたTHz帯での位相計測技術の開発

特願2020-102848

秋田わか杉奨励賞2020

2016～2019 日本板硝子材料
工学助成会2019 スズキ財団
研究助成

新技術説明会 2021

R. Ito, *et al.*, JJAP, 60, 072007 (2021).

C2. 液晶デバイスを用いたTHz帯での位相計測技術の高速化

課題3を解決

2020～2022
JST A-STEP2023 スズキ財団
成果普及助成

特願2023-013839

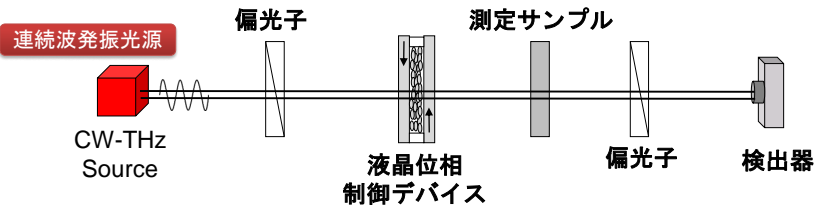
イノベーションジャパン 2023⁷

Photonics West 2024 招待講演

発表内容

- 自己紹介
- 研究内容の紹介
- 液晶デバイスを用いたTHz帯での位相計測
- 開発した技術の応用展開
- まとめ

開発したシステムの概要 知財①

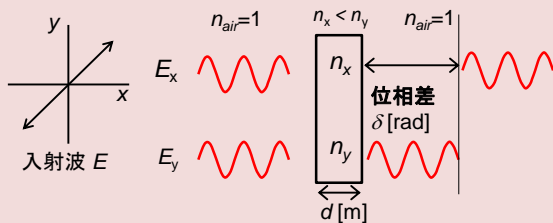


水素結合性の液晶デバイスを使ってTHz帯で位相を計測する技術を発明した

[論文] R. Ito, *et al.*,
JJAP, 60, 072007 (2021).

[特許]特願2020-102848号、「位相検査装置」
伊東良太ほか、令和2年6月15日

本手法で計測される位相(差) δ



測定試料のx方向の屈折率とy方向の屈折率の差に起因した位相差が計測される→複屈折の計測が可能

新規性

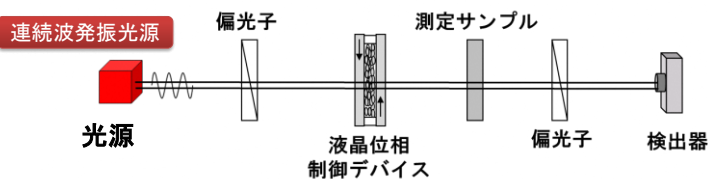
- 水素結合性の液晶の利用した
- THz帯で位相計測を可能にした

特徴と進展性

- シンプルな光路である
- ノイズに強く、高精度な測定が可能
- どの種類のCW-光源でも計測可能
- 強力なCW光源による計測のため、工業的な利用に展開する可能性

9

液晶デバイスを用いた位相計測



◆ 液晶位相制御デバイスに電圧を印加することで、液晶による位相差を $\phi = \pi/2, \pi, 3/2\pi, 2\pi$ と変えて強度を測定する。

$$I_1 = I' + I'' \{1 - \cos(\delta + \phi_1)\} = I' + I'' \left\{1 - \cos\left(\delta + \frac{\pi}{2}\right)\right\} = I' + I''(1 + \sin \delta)$$

$$I_2 = I' + I'' \{1 - \cos(\delta + \phi_2)\} = I' + I'' \{1 - \cos(\delta + \pi)\} = I' + I''(1 + \cos \delta)$$

$$I_3 = I' + I'' \{1 - \cos(\delta + \phi_3)\} = I' + I'' \left\{1 - \cos\left(\delta + \frac{3\pi}{2}\right)\right\} = I' + I''(1 - \sin \delta)$$

$$I_4 = I' + I'' \{1 - \cos(\delta + \phi_4)\} = I' + I'' \{1 - \cos(\delta + 2\pi)\} = I' + I''(1 - \cos \delta)$$

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

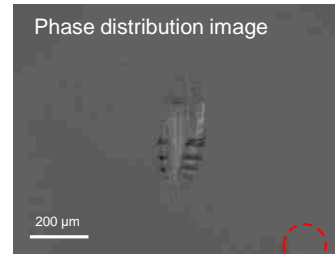
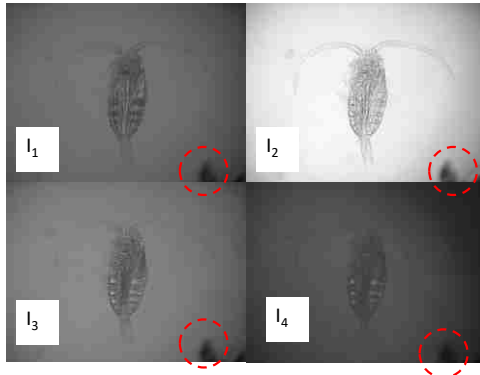
- ◆ 簡単な計算によりサンプルでの位相差 δ が求まる
- ◆ I', I'' のノイズを含む成分がキャンセルされるため、ノイズに強い計測が可能

10

可視光での測定例

液晶で位相を変えた4つの画像から位相像を得る

T. Nose *et al.*, Proc. of SPIE, 7414, 741408 (2009).



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

可視光域では、液晶を使い位相イメージングを実現している

しかし・・・

THz帯では液晶分子の長軸と短軸の吸収係数に差があり、この手法を簡単には使えない

→我々は材料から見直しを行い、位相計測の実現を目指した

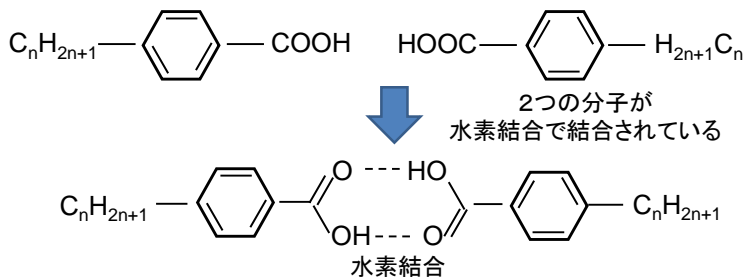
11

水素結合性液晶のTHz帯での測定値

水素結合性液晶: 2分子が結合した特殊な液晶

R. Ito, *et al.*, Appl. Sci. 8(12), 2478, pp.1-8, (2018)

R. Ito, *et al.*, IEICE Trans. Electron., E105, 68, (2022)



2.5THzでの水素結合性液晶の物性値

	2.5 THz			589 nm
	$\alpha_e(\text{cm}^{-1})$	$\alpha_o(\text{cm}^{-1})$	Δn	Δn
E44	19	46	0.20	0.24
LC1 [※]	27	27	0.17	0.11

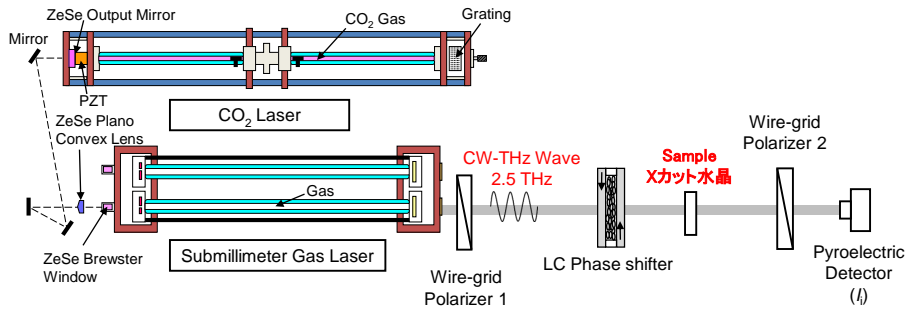
新技術

※LC1 Hydrogen-bonded LC

水素結合性の液晶がTHz帯で吸収特性が等方的であることを発見した($\alpha_o = \alpha_e$) 12

THz帯での位相計測の結果

R. Ito, et al., JJAP, 60, 072007 (2021).



	d (μm)	I_1 (112 V)	I_2 (99 V)	I_3 (90 V)	I_4 (78 V)	δ (rad)	Δn_{sample}
Sample 1	1141	0.018	0.002	0.027	0.036	2.89	0.05
Sample 2	500	0.001	0.021	0.028	0.012	1.26	0.05

Xカット水晶の複屈折を精度よく求められている

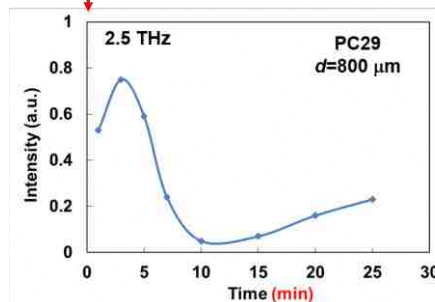
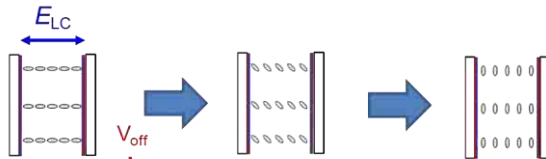
水素結合性の液晶デバイスを使ってTHz帯で位相を計測する技術

高速化についての取組 知財②

特願2023-013839

Photonics West 2024 招待講演

THz帯で用いている液晶デバイスの戻り時間を測定



電圧を切った際の戻り時間が、25分以上と非常に遅い...

可視光に比べ、液晶層が厚いことに起因している

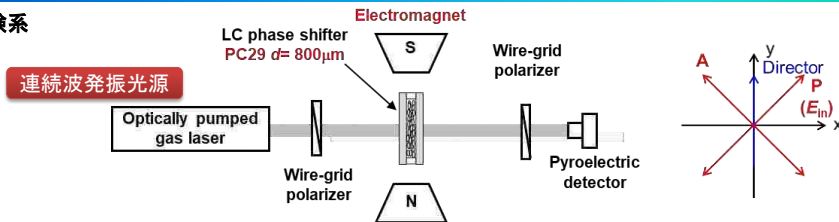
磁場による駆動を取り入れ、高速化に取組んだ

※2020~2022 JST A-STEP

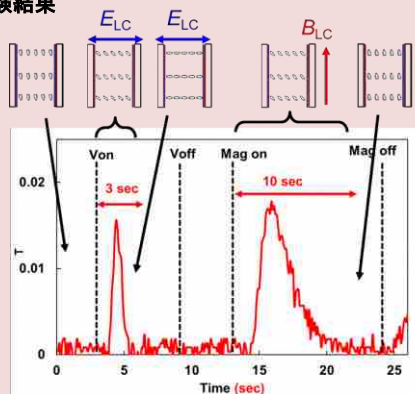
14

厚い液晶デバイスを高速で駆動する技術

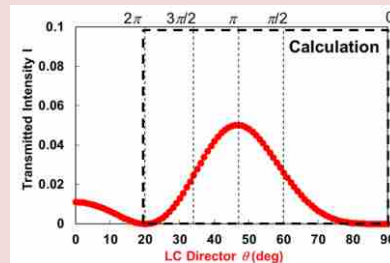
実験系



実験結果



計算結果

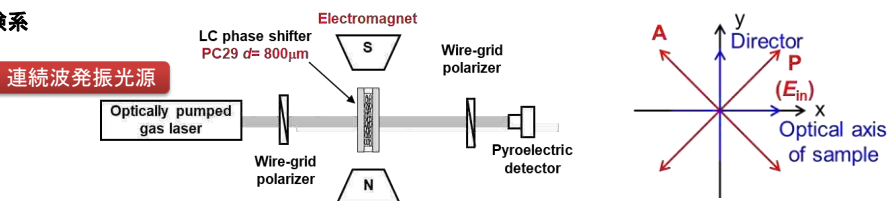


2π の位相差を10秒以内に制御する技術の開発に成功

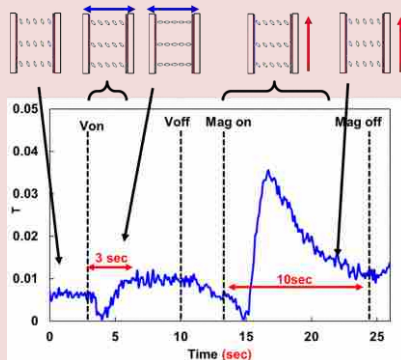
15

高速駆動技術を用いた位相計測

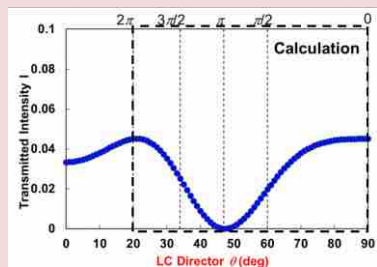
実験系



実験結果



計算結果



10秒以内でTHz帯での位相計測に成功

16

開発した技術について

特願2020-102848

水素結合性の液晶デバイスを使ってTHz帯で位相を計測する技術

秋田わか杉奨励賞2020
R. Ito, et al., JJAP, 60, 072007 (2021).
新技術説明会 2021

特願2023-013839

厚い液晶デバイスを高速で駆動する技術

イノベーションジャパン 2023
Photonics West 2024 招待講演



秋田わか杉奨励賞授賞式(左:佐竹秋田県知事)

17

発表内容

- 自己紹介
- 研究内容の紹介
- 液晶デバイスを用いたTHz帯での位相計測
- **開発した技術の応用展開**
- まとめ

18

THz波のイメージング応用

- ・THz波は紙やプラスチックを透過する
- ・様々な物質に対し、特殊な吸収特性を持ち、ものを見分けることができる。

封筒内部の危険薬物を非破壊で検査する



封筒内の覚醒剤や鎮痛剤のTHz波イメージング像

Optics Express 11, 2549-2554, 2003

隠したナイフを可視化する



新聞内にナイフを隠し持った人のTHz波イメージング像

Science, vol.297, p763 (2002)

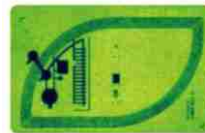
がん細胞を可視化する



馬の食道がんのTHzイメージング像

http://www.pi1.uni-stuttgart.de/research/Methoden/THzMikroSpektrometer_e.php

工業製品を非破壊で検査する



SuicaのTHzイメージング像

https://sangakukan.jst.go.jp/journal/journal_contents/2015/11/article_s/1511-02-3/1511-02-3_article.html

THz波にしか見えないものをターゲットにすることが重要

19

連続波発振(CW)THz光源を用いたイメージング技術(現状)

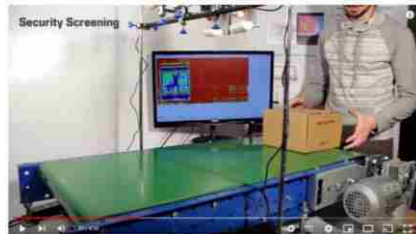
INO (カナダ)



Lytid (フランス)



TeraSense (アメリカ)

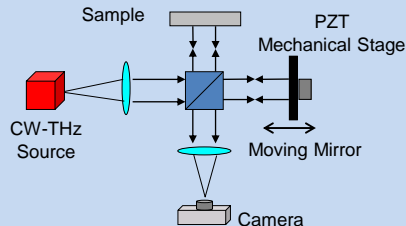


半導体ベースのTHz光源を使い、装置の小型化、計測の高速化が進んでいる

**しかし、現状では強度のみのイメージング
→我々が開発した手法を使うことで位相計測が可能になる**

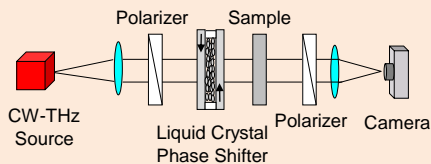
強度のイメージングから位相のイメージングへ

一般的な干渉による測定



◆ 複雑な光路が必要で振動に弱い

液晶デバイスを使った測定



◆ 光路がシンプルで振動に強い



光路に液晶デバイスを入れるだけで良い



従来の強度のみのイメージング
⇒位相+強度のイメージングにできる技術

今後の応用展開の可能性

A 工業製品の非破壊検査

- 塗装膜の品質管理
- 塗装の下のかびの検出
- ゴム製品の品質管理
- CFRPの品質管理



現在一般に使用されているX-rayで検出出来ない領域をカバーする非破壊検査装置を創出する

航空機・自動車産業における独自技術

B 医療応用

- 錠剤のコーティング検査
- 錠剤内部の化学組成成分検査
- 皮膚がんの検査
- 採血フリーの血液検査



人体に安全なTHz波を利用することで、他の医療機器とは異なるアプローチの検査装置を創出する

医療福祉・ヘルスケア産業における先進技術

本日の内容以外にも、幅広い分野に関して、技術相談や共同研究は積極的に受け入れております。

お問い合わせ先

秋田県立大学 本荘キャンパス

地域連携・研究推進センター

TEL 0184-27-2947

FAX 0184-27-2194

e-mail h_stic@akita-pu.ac.jp 22

謝辞

本研究は、以下の研究助成のもと行われました。

日本学術振興会 科学研究費助成事業 基盤研究(C)
国立研究開発法人科学技術振興機構 A-STEPトライアウト
公益財団法人スズキ財団 平成30年度科学技術助成
公益財団法人スズキ財団 令和5年度成果普及技術助成
公益財団法人日本板硝子材料工学助成会 研究助成
公益財団法人日本板硝子材料工学助成会 研究成果普及助成
秋田県立大学 アドバンスト自主研究制度

ご清聴ありがとうございました