

令和 6 年 6 月 27 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04572

研究課題名(和文) 液晶を用いたNRDガイド型テラヘルツ波移相器の実現

研究課題名(英文) NRD waveguide type terahertz wave phase shifter using liquid crystal

研究代表者

森武 洋 (Moritake, Hiroshi)

防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群)・電気情報学群
・教授

研究者番号：90531799

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：NRDガイド型移相器に液晶を使用する際の応答時間を改善するため、配向マイクロファイバーと液晶の複合素子を用いた。電界紡糸法によりマイクロファイバーを作製する際に溶液濃度を高くすることにより、ファイバー径を太くすることが可能となり、ファイバー径を太くすることにより閾値電圧の増加を抑え液晶単体に近い誘電異方性を保ちながら、電圧を除去した複合素子の立下り応答時間を300 ms以下に抑えることを実現した。

この複合素子を用いて、100 GHzで動作する4素子フェーズドアレイアンテナを作製した。作製したアンテナは最大±41度の走査角を有し、走査角の切替応答時間が250 msであることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

液晶を配向マイクロファイバーと複合化することにより、厚い液晶層を必要とする応用時に問題となる電圧を除去した際の応答時間の改善を明らかにでき、液晶応用の新たな可能性を開いた。また、液晶を用いた100 GHz帯の変移相器を実現し、この移相器を用いたフェーズドアレイアンテナを実際に作製し、電波の放射方向を操作できることを明らかにした。この成果は今後通信への応用が期待されるテラヘルツ波の利用に必要な技術の実現の可能性を示すものである。

研究成果の概要(英文)：To improve the response time when using liquid crystal in an NRD waveguide type terahertz wave phase shifter, aligned microfiber / liquid crystal composite was used. By increasing the solution concentration when producing the microfiber by electrospinning, it became possible to increase the fiber diameter. By increasing the fiber diameter, it was possible to suppress the increase in threshold voltage and maintain dielectric anisotropy close to that of the pure liquid crystal, while suppressing the decay response time of the composite element when the voltage was removed below 300 ms.

Using this composite, four-element phased array antenna operating at 100 GHz was fabricated. It was confirmed that the fabricated antenna has a maximum scan angle of ±41 degrees, and the response time of scan angle switching was 250 ms.

研究分野：電気電子工学

キーワード：液晶 可変移相器 テラヘルツ波 ミリ波 配向マイクロファイバー フェーズドアレイアンテナ 非放射誘電体線路 NRDガイド

1. 研究開始当初の背景

(1) 液晶は液体の持つ流動性と結晶の持つ異方性を併せ持つ材料であり、最も配向秩序が低いネマティック液晶はディスプレイ等の光デバイスに広く応用されている。一方、ナノファイバーは直径が数～数 100 nm の高分子繊維であり、超比表面積効果などを有することから様々な分野での応用が期待されている。ナノファイバーの作製法の一つにエレクトロスピンニング法がある。エレクトロスピンニング法はシリンジに入った高分子溶液とコレクタ間に高電圧を印加しながらシリンジから溶液を押し出すことにより、溶液が電荷を帯びジェットとなってコレクタに放射され、直径が nm オーダーのファイバーとなってコレクタに付着させる紡糸方法である。このとき、ドラムコレクタを使用しコレクタを回転させながらナノファイバーを紡糸することにより、一方向に配向したナノファイバーを作製することが可能である。我々は、ドラム上に金属の突起構造を作製しシリンジとドラム間の電界分布を制御することにより、配向性の高いポリビニルアルコール(PVA)やポリアクリロニトリル(PAN)ナノファイバーの作製に成功している。

(2) 周波数が 100 GHz から 10 THz のテラヘルツ波は、通信の高速・広帯域化やセキュリティ応用などその利用が増大している。例えば、100～数 100 GHz の比較的周波数の低いテラヘルツ波領域では、従来用いられているマイクロ波やミリ波の高周波化の観点で超高速通信の実現に向けた研究が行われており、これらの周波数帯域で用いる移相器などの制御デバイスが求められている。しかし、マイクロ波やミリ波領域で用いられているマイクロストリップ線路やコプレーナ線路といった導波路は、テラヘルツ波領域では損失が大きいなど、テラヘルツ波を低損失で導波させる線路も重要である。このような中で、非放射型誘電体線路(Non-Radiative Dielectric Waveguide: NRD ガイド)は 2 枚の金属板間に誘電体を挟み、誘電体に電磁波を照射したとき、誘電体の存在する部分は電磁波が伝搬可能であるが、誘電体の存在しない部分は電磁波が伝搬できないように誘電体の誘電率を考慮し厚さを決定することにより、誘電体内に閉じ込められる形で電磁波が伝搬する伝送線路の一つであり、ミリ波など同軸線路やマイクロストリップ線路などでの伝搬が困難な高周波帯域で有効な導波路として用いられている。

2. 研究の目的

(1) NRD ガイドに周波数が 350 GHz のテラヘルツ波を伝搬させる場合、誘電体の誘電率が 2.25 (屈折率が 1.5) とすると、許容される誘電体の厚さは 280～420 μm となり、誘電体として液晶単体を使用した場合、電圧を除去したときの立ち下がり応答時間は液晶層厚の 2 乗に比例するため、立ち下がり応答時間は 100 s 以上となり実用上大きな問題となる。この問題を解決するため、配向ナノファイバーにネマティック液晶を充填した複合素子の利用を提案する。ナノファイバーに使用する高分子の種類によっては、350 GHz のテラヘルツ波に対しても吸収の大きな材料もあるため、デバイスの損失を抑えることを考え低損失材料の選定が必要となる。一方、ナノファイバーと液晶との相互作用の観点からの検討も必要であることから、配向ナノファイバーとして液晶に配向性を付与できる高分子材料で、テラヘルツ波に対して低損失な材料を選定する。また、NRD ガイドの誘電体として全て液晶・高分子複合素子を利用するのではなく、移相器以外の導波路には損失の低い高分子材料を使用する。このように、ナノファイバー材料と導波路用高分子材料についてテラヘルツ波特性を考慮し選定し、移相器を作製する。図 1 に基本的な位相器の断面構造を示す。図 1(a)は液晶に駆動用の電界を印加していない状態であり、配向ナノファイバーからの配向規制力によって液晶はナノファイバーに沿って配向している。この時、液晶の配向方向とテラヘルツ波の電界方向は一致しており、液晶分子長軸方向の屈折率を感じてテラヘルツ波は伝搬する。一方、図 1(b)は液晶に駆動用の低周波電界を印加した状態であり、この状態では低周波電界に沿って液晶は配向する。このため、伝搬するテラヘルツ波の電界方向と液晶分子の配向方向は直交することとなり、液晶分子短軸方向の屈折率を感じてテラヘルツ波は伝搬する。この二つの状態でテラヘルツ波の感じる屈折率の違いにより、位相差が生じる。

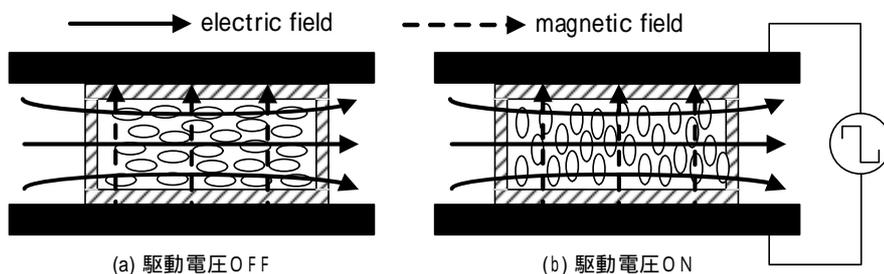


図1 NRDガイド (LSM Mode) における電界・磁界方向と液晶への駆動電圧の有無による配向方向

(2) NRD ガイドは、誘電体中に閉じ込められた形でテラヘルツ波が伝搬するため、線路を曲げたり分岐したりすることが可能である。図 2 は本研究で作製する NRD ガイド中に液晶装荷移相器を導入したフェーズドアレーアンテナの概念図である。この図の例では 4 つに分配されたテ

ラヘルツ波に対して移相器により所望の位相差を与えることにより、アンテナから放射されるテラヘルツ波のビーム方向を変化させることが可能となる。NRDガイドの移相器以外の誘電体部分で使用する誘電体についても、低損失な材料を選定する必要があるが、本研究では

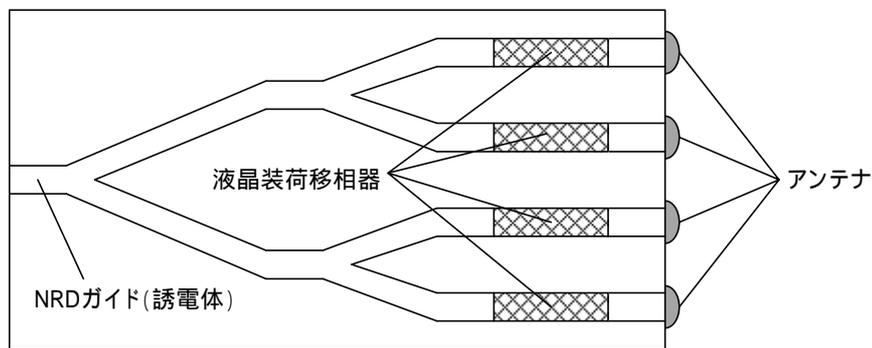


図2 NRDガイド型液晶装荷移相器によるフェーズドアレイアンテナの概念図

3D プリンターで作製可能な高分子の中から、テラヘルツ波における損失が低い材料を選定し、誘電体導波路を作製することにより、フェーズドアレイアンテナ全体としての損失も抑えたデバイスの実現を目指す。本研究では、このように低損失でデバイスとして使用可能な応答性を有するテラヘルツ波フェーズドアレイアンテナを実現することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 液晶と複合化する配向ナノファイバーは、コレクタが回転するドラムコレクタを取り付けたエレクトロスピンニング装置を用いて作製した。ファイバーの材料としてはポリアクリロニトリルを用い、溶媒としてはジメチルホルムアミドを用いた。ポリアクリロニトリルのジメチルホルムアミド溶液を用い、ドラムコレクタを回転させながら紡糸することにより配向ナノファイバーを作製した。この際、印加電圧とドラムコレクタの回転速度は溶液濃度によりそれぞれ最適な値を用いて行った。作製したシート状のナノファイバーを透明電極付ガラスでスペーサを介して挟みセルを構成し、セル中にネマティック液晶を含浸させることにより配向ナノファイバー/ネマティック液晶複合素子を作製した。複合素子の電界に対する応答時間の測定は、ロックインアンプを用いて電界印加・除去時のキャパシタンス変化の応答を測定することにより行った。また、テラヘルツ波帯域における複素誘電率の測定は、テラヘルツ時間領域分光法を用いたテラヘルツ波解析装置により行った。

(2) NRD ガイドの誘電体線路として、テラヘルツ波における低損失であるポリエチレンを用いて作製した。作製には、熱溶融方式の3Dプリンターを用いて作製した。また、NRDガイドの特性評価には周波数エクステンダーを装着したネットワークアナライザを用いた。この時、テラヘルツ波の入出力が導波管構造となるため、導波管からNRDガイドへの変換器を電磁界シミュレーターを用いて設計し作製した。また、4素子フェーズドアレイアンテナの分配器は、当初はNRDガイドの分配器を作製する予定であったが、導波管において電磁界シミュレーターを用いて分配器を設計したところ、良好な結果が得られたため、導波管部分で分配器を作製した。4素子フェーズドアレイアンテナは、作製の容易さを考慮して100 GHzにおいて動作するものとした。このアンテナの特性評価は、電波吸収体で覆われた環境で周波数エクステンダーを装着したネットワークアナライザを用いて行った。

4. 研究成果

(1) 図3に種々の溶液濃度で作製した配向ナノファイバーと液晶を複合化した厚さ50 μmの複合素子の誘電異方性の印加電圧依存性の測定結果を示している。なお、ファイバーの平均直径は濃度が低い8 wt%の時には0.38 μmであったが、濃度の増加するにつれて直径も増加し、濃度

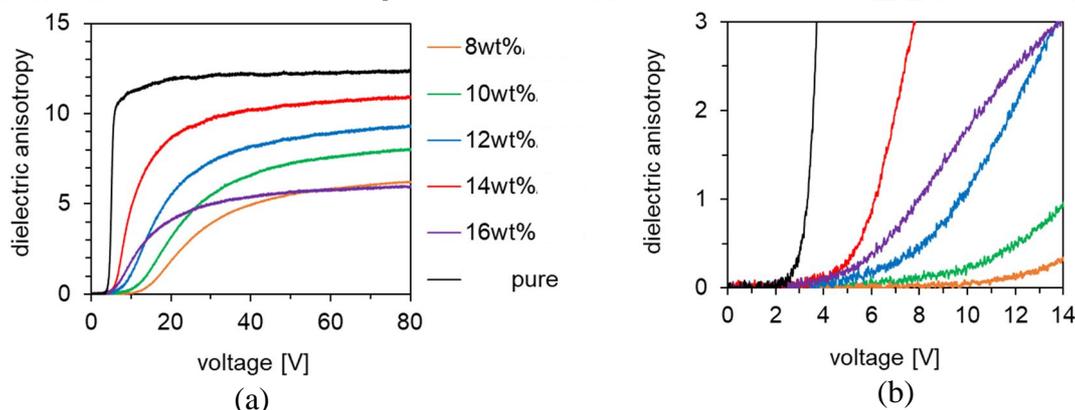


図3 種々の濃度で作製した複合素子の (a) 誘電異方性の電圧依存性と (b) その拡大図

が 14 wt%の時は 1.41 μm の直径であった。また、複合素子におけるファイバーの体積比は、濃度が 8 wt%の時には 16.1%、濃度が 14 wt%の時は 11.6%と濃度の増加とともに減少することが確認された。図 3(a)の結果から、濃度の増加とともに誘電異方性が増加し、単体液晶の結果に近いことがわかる。これは、濃度を増加させるとファイバーの直径が増加し、ファイバー間隔が増加することによりファイバーからの規制力が弱まったためであると考えられる。また、図 3(b)より閾値電圧の増加も濃度の増加とともに抑制されていることが確認できた。

図 4 はこれらの複合体の電圧印加・除去時の応答時間の印加電界依存性の測定結果である。図 4(a)の結果より、濃度を増加するとともに立ち上がり時間は減少していることが確認できた。また、図 4(b)の結果より、濃度を増加させていくと立ち下がり時間は増加しているが、液晶単体の約 10 s から比べると濃度が 14 wt%の複合体でも 270 ms であり、大幅に立ち下がり時間が改善されていることが確認できた。これらの結果から、液晶を配向ファイバーと複合化することにより、立ち下がり時間を大幅に改善できることを確認するとともに、ファイバー直径が 1 μm を超えるマイクロファイバーを用いることにより、液晶単体に近い誘電異方性と閾値電圧を維持しながら、立ち下がり時間を大幅に改善できることが確認できた。

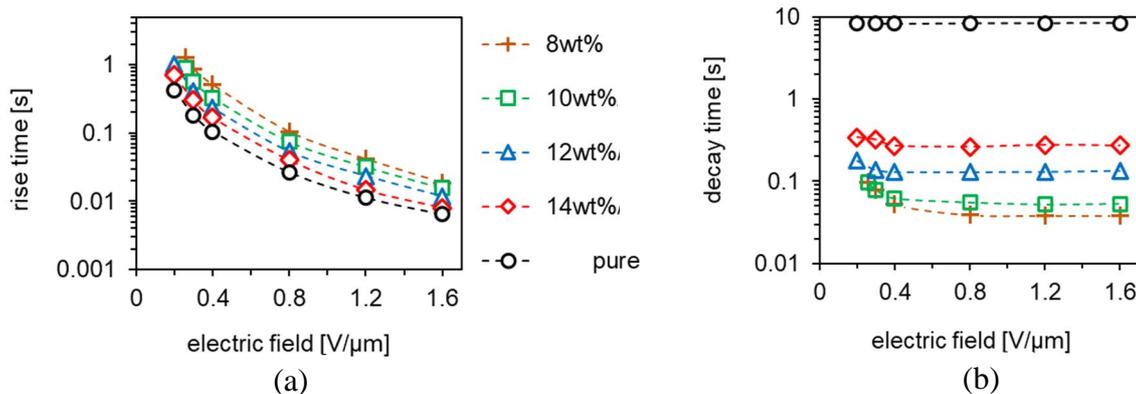


図 4 種々の濃度で作製した複合体の (a) 立ち上がり時間と (b) 立ち下がり時間

(2) 図 5 に設計した 4 素子フェーズドアレイアンテナの構造を示す。この図の左側から方形導波管、分配器、NRD ガイド、液晶 / マイクロファイバー複合体移相器、誘電体アンテナとなっており、方形導波管から入射したテラヘルツ波が分配された後、各移相器でそれぞれの位相変化を与えられアンテナから空間中へ放射される。分配器は上下と中央部で伝搬距離の違いから位相が異なることを解消するため、誘電体の長さを変化させて移相器に入射するテラヘルツ波の位相が同位相となるように設計している。この図ではアンテナ間隔は 3 mm であるが、変換器の構造を工夫することによりアンテナ間隔が 2 mm のフェーズドアレイアンテナも設計した。

この 2 種類のフェーズドアレイアンテナの放射特性を図 6 に示す。この図から、素子間に与える位相差を増加するとともに放射角が増加していることがわかる。また、

位相差の符号を変化させることにより、走査方向の符号も変化することが確認できる。図 6(a) と (b) を比較すると、アンテナ間隔の短い図 6(b) の結果の方が、走査角が大きくなっていることも確認できる。この結果から、アンテナ間隔が 3 mm の場合は放射角は ± 27 度であり、アンテナ間隔が 2 mm の場合は ± 41 度であった。

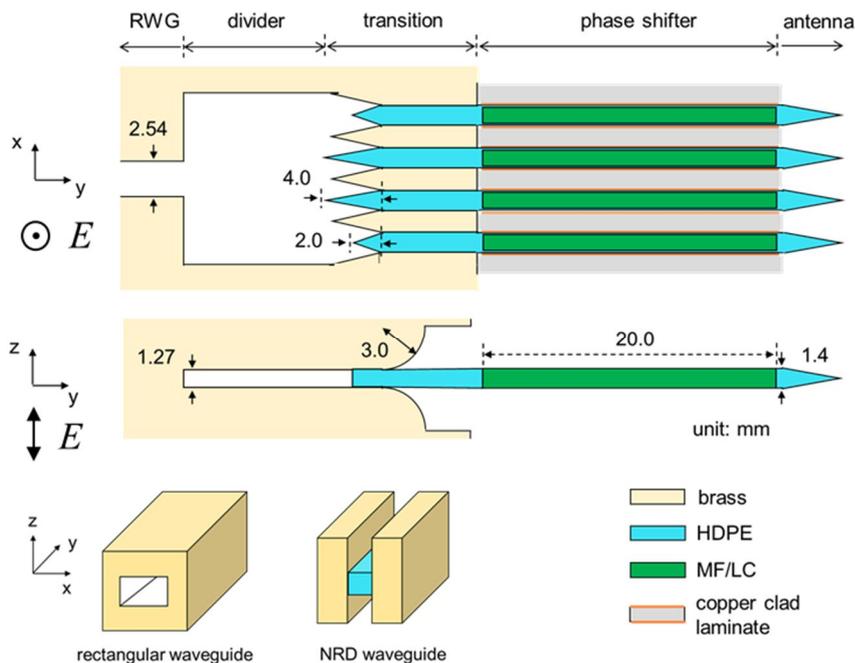


図 5 複合体を使用した 100 GHz 帯フェーズドアレイアンテナの構造

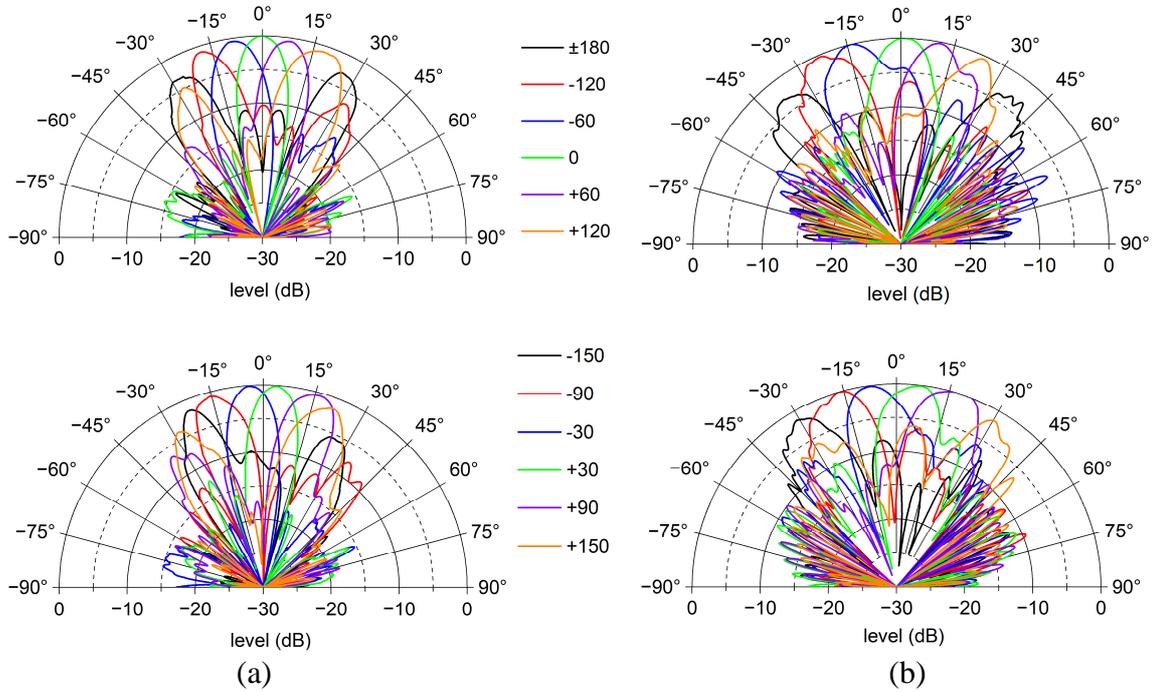


図 6 作製したアンテナ間隔が (a)3 mm と(b)2 mm のフェーズドアレイアンテナの放射パターン

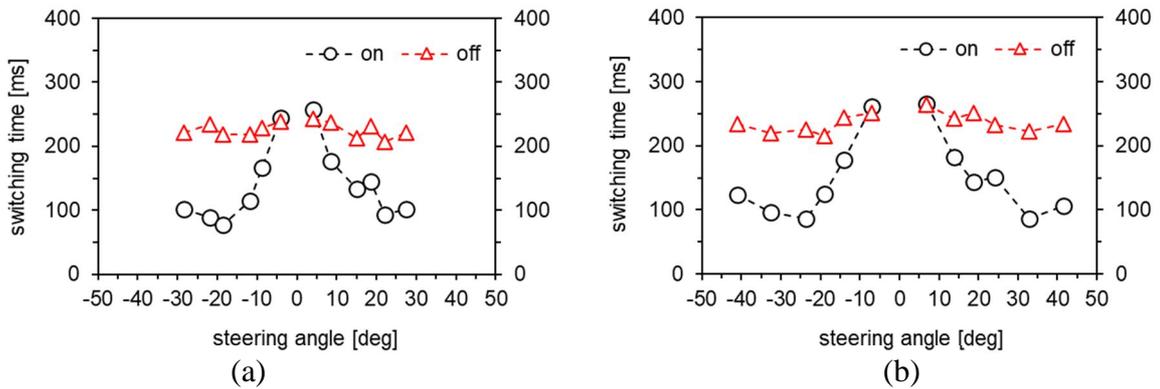


図 7 アンテナ間隔が(a)3 mm と(b) 2mm のフェーズドアレイアンテナの
ビームパターンの切り替え時間と走査角との関係の測定結果

図 7 はこれらの 2 種類のフェーズドアレイアンテナのビームパターンの切り替え時間と走査角の関係の測定結果である。本測定では、電圧 0 の走査角が 0 度と電圧印加時の間の切り替え時間を測定した結果である。この図から、電圧を印加した時の切り替え時間は角度が小さいほど長くなっている。これは、走査角が小さいときには複合素子に印加する電圧が低くなるため、図 4 で示した立ち上がり時間の結果を反映したものであると言える。一方、電圧を除去した時の切り替え時間は走査角度に依らず一定であった。これらの結果から、すべての範囲の切り替え時間は 250 ms 以下となっており、液晶を用いた実時間で応答可能なフェーズドアレイが実現できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Lang Trong Nghia, Inoue Yo, Moritake Hiroshi	4. 巻 61
2. 論文標題 Optimization of the electrospun-aligned microfiber composite with liquid crystal for terahertz wave variable phase shifters	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 071002 ~ 071002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac78ae	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Trong Nghia Lang, 井上 曜, 森武 洋	4. 巻 141
2. 論文標題 液晶装荷NRDガイド型テラヘルツ移相器の電界分布解析と応答改善	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電気学会論文誌A	6. 最初と最後の頁 220 ~ 225
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejfms.141.220	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Inoue Yo, Moritake Hiroshi	4. 巻 47
2. 論文標題 Demonstration of wavelength-swept laser using cholesteric liquid-crystal cavity and its application for laser scanning	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 1303 ~ 1303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OL.451543	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Lang Trong Nghia, Bui Van Bao, Inoue Yo, Moritake Hiroshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Response Improvement of Liquid Crystal-Loaded NRD Waveguide Type Terahertz Variable Phase Shifter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Crystals	6. 最初と最後の頁 307 ~ 307
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/cryst10040307	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nghia Lang Trong, Inoue Yo, Moritake Hiroshi	4. 巻 141
2. 論文標題 Electric Field Distribution Analysis and Response Improvement of Liquid Crystal-loaded NRD Waveguide Type Terahertz Phase Shifter	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials	6. 最初と最後の頁 220 ~ 225
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejfms.141.220	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Lang Trong Nghia, Inoue Yo, Moritake Hiroshi	4. 巻 63
2. 論文標題 Continuously reconfigurable 100 GHz band phased array antenna with improved response time using a microfiber/liquid crystal composite	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 052003 ~ 052003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ad369f	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Lang Trong Nghia, Inoue Yo, Moritake Hiroshi	4. 巻 13
2. 論文標題 Electronically reconfigurable 100-GHz band reflectarray for wireless communication based on microfiber/liquid crystal composite	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/comex.2024XBL0041	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Trong Nghia Lang, Yo Inoue, Hiroshi Moritake
2. 発表標題 Electrically controlled 2 terahertz wave phase shifter using aligned microfiber/ liquid crystal composite
3. 学会等名 28th International Liquid Crystal Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroshi Moritake, Trong Nghia Lang, Yo Inoue
2. 発表標題 Refractive index measurement of nematic liquid crystals by terahertz time-domain spectroscopy and s-parameter method with vector network analyzer
3. 学会等名 28th International Liquid Crystal Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 ラン チョン ギア, 井上 曜, 森武 洋
2. 発表標題 エレクトロスピニング法による配向マイクロファイバーの作製と そのテラヘルツ波帯液晶移相器への応用
3. 学会等名 電気学会令和4年基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Trong Nghia Lang, 井上 曜, 森武 洋
2. 発表標題 テラヘルツ波領域における配向マイクロファイバー/液晶複合体の 特性評価
3. 学会等名 2022年 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Trong Nghia Lang, Yo Inoue, Hiroshi Moritake
2. 発表標題 Structural design and response characteristics of 100 GHz band liquid crystal variable phase shifter using electrospun-aligned microfiber
3. 学会等名 Optics of Liquid Crystal (OLC) 2021 Satellite WorkShop (SWS) 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Trong Nghia Lang, 井上 曜, 森武 洋
2. 発表標題 配向マイクロファイバー / 液晶複合体を用いた100GHz帯可変移相器の 特性評価
3. 学会等名 2023年 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 森武 洋, ラン チョン ギア, 井上 曜
2. 発表標題 配向マイクロファイバー / ネマティック液晶 複合体装荷100GHz帯テラヘルツ波 可変移相器の特性評価
3. 学会等名 令和5年電気学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Trong Nghia Lang, 井上 曜, 森武 洋
2. 発表標題 矩形導波管と接続可能なNRDガイド型液晶装荷 テラヘルツ波移相器
3. 学会等名 電気学会令和3年基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Trong Nghia Lang, 井上 曜, 森武 洋
2. 発表標題 液晶装荷テラヘルツ波移相器用325 ~ 500 GHz帯矩形導波管 / NRDガイド・Hガイド変換器の設計と伝送特性解析
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Trong Nghia Lang, 井上 曜, 森武 洋
2. 発表標題 矩形導波管 / NRDガイド変換部を有する液晶テラヘルツ波可変移相器の設計と その特性評価
3. 学会等名 2021年日本液晶学会討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Trong Nghia Lang, Yo Inoue, and Hiroshi Moritake
2. 発表標題 High-performance liquid-crystal-loaded terahertz wave variable phase shifter with non-radiative dielectric waveguide structure
3. 学会等名 19th Optics of Liquid Crystals 2021 (OLC2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Trong Nghia Lang, 井上 曜, 森武 洋
2. 発表標題 テラヘルツ波移相器に用いる液晶と電界紡糸ナノ / マイクロファイバー複合体の最適化
3. 学会等名 第31回日本MRS年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Trong Nghia Lang, 井上 曜, 森武 洋
2. 発表標題 テラヘルツ波可変移相器の応用に向けた配向マイクロファイバー / 液晶複合体の応答特性
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Lang Trong Nghia、井上 曜、森武 洋
2. 発表標題 Liquid crystal based NRD waveguide type terahertz phase shifter
3. 学会等名 11th International Symposium on Organic Molecular Electronics (ISOME2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Lang Trong Nghia、井上 曜、森武 洋
2. 発表標題 液晶装荷NRDガイド型テラヘルツ波移相器の電界分布解析と応答改善
3. 学会等名 令和2年電気学会材料・基礎・共通部門大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Lang Trong Nghia、井上 曜、森武 洋
2. 発表標題 配向ナノファイバー/ネマティック液晶複合体を用いたNRDガイド型テラヘルツ波可変移相器の特性評価
3. 学会等名 2020年日本液晶学会オンライン研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Lang Trong Nghia、井上 曜、森武 洋
2. 発表標題 テラヘルツ波可変移相器に用いる配向ナノファイバー/液晶複合体
3. 学会等名 第30回日本MRS年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Lang Trong Nghia、井上 曜、森武 洋
2. 発表標題 テラヘルツ波フェーズドアレイアンテナに用いる液晶可変移相器
3. 学会等名 第68回応用物理学春季学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関