

マイクロ波からテラヘルツ波帯で動作する 液晶装荷可変移相器に関する研究

防衛大学校理工学研究科後期課程

電子情報工学系専攻 エレクトロニクス工学教育研究分野

ブイ ヴァン バオ

平成31年3月

目次

第 1 章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	液晶装荷高周波デバイスの開発背景	1
1.3	液晶の概要	4
1.3.1	液晶発見の歴史	4
1.3.2	液晶の基礎	5
1.3.3	液晶の分類	6
1.3.4	ネマティック液晶	7
1.3.5	液晶分子と電界の相互作用	8
1.4	液晶を用いるマイクロ波ミリ波伝送線路	10
1.5	液晶を用いるテラヘルツ波伝送路の提案	13
1.6	本研究の目的	14
1.7	論文の構成	17
第 2 章	液晶装荷 CPW 型および MSL 型マイクロ波ミリ波移相器	19
2.1	はじめに	19
2.2	液晶装荷 CPW 型移相器の構造・動作原理および作製方法	20
2.2.1	構造	20
2.2.2	液晶装荷 CPW 型移相器の動作原理	21
2.2.3	液晶装荷 CPW 型移相器の作製方法	22
2.3	液晶装荷 MSL 型移相器の構造・動作原理および作製方法	24
2.3.1	構造	24
2.3.2	液晶装荷 MSL 型移相器の動作原理	27

2.4	液晶装荷 CPW 型および MSL 型移相器を用いた液晶デバイスの比較と検討	28
2.5	マイクロ波ミリ波測定系	29
2.5.1	立ち上がり応答時間および立ち下がり応答時間の定義	29
2.5.2	マイクロ波ミリ波測定系	30
2.6	液晶装荷 CPW 型および MSL 型移相器の動作確認	32
2.7	まとめ	36
第 3 章	光重合型高分子安定化ネマティック液晶による CPW 型および MSL 型移相器の応答改善	37
3.1	はじめに	37
3.2	ITO ガラス平行平板セルの作製	38
3.2.1	ITO ガラス平行平板セルの作製過程	38
3.2.2	セル厚の測定方法	39
3.3	PSNLC の基礎	42
3.4	光重合型 PSNLC の調製	43
3.5	複素誘電率の駆動電圧依存性測定	45
3.5.1	測定系と測定原理	45
3.5.2	平行配向処理とアンチ平行配向処理の違い	47
3.5.3	複素誘電率の駆動電圧依存性の測定結果および考察	49
3.6	複素誘電率の過渡応答特性測定結果および考察	50
3.7	光重合型 PSNLC 装荷 CPW 型移相器	53
3.7.1	光重合型 PSNLC 装荷 CPW 型移相器の作製	53
3.7.2	光重合型 PSNLC 装荷 CPW 型移相器の移相特性および時間応答特性の評価	53
3.8	光重合型 PSNLC 装荷 MSL 型移相器	57

3.8.1	光重合型 PSNLC 装荷 MSL 型移相器の作製	57
3.8.2	光重合型 PSNLC 装荷 MSL 型移相器の移相特性および時間応答特性の評価	58
3.9	3 本線平行平板セルにおける高分子ネットワーク形成の確認	62
3.10	まとめ	67
第 4 章	液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器	69
4.1	はじめに	69
4.2	テラヘルツ波の概要	70
4.2.1	テラヘルツ波の定義	70
4.2.2	テラヘルツ波の応用	70
4.2.3	テラヘルツ波による位相変化の原理	71
4.3	基本 NRD ガイド	72
4.3.1	NRD ガイドの概要	72
4.3.2	動作原理	73
4.4	液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の構造	74
4.4.1	液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器	74
4.4.2	液晶装荷 PET フィルム挿入した NRD ガイド型テラヘルツ波移相器	76
4.5	テラヘルツ波測定系	76
4.5.1	測定装置の構成	76
4.5.2	テラヘルツ波測定系	77
4.6	ネマティック液晶 5CB 装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の測定結果	78
4.6.1	350 μm 液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の測定結果	78
4.6.2	100 μm 及び 25 μm 液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の測定結果	80
4.7	まとめ	83

第 5 章	二周波駆動およびナノファイバー複合体による液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の応答改善	84
5.1	はじめに	84
5.2	二周波液晶による応答時間の改善	84
5.2.1	二周波液晶	84
5.2.2	改善原理	85
5.2.3	各液晶の誘電率の周波数依存性	86
5.2.4	RDP-A4188 液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の測定結果	87
5.2.5	二周波駆動による RDP-A4188 液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の測定結果	89
5.3	液晶 / ナノファイバー複合体による応答時間の改善原理	93
5.3.1	まえがき	93
5.3.2	ナノファイバーの作製	94
5.3.3	改善原理	96
5.3.4	ナノファイバー複合体による液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の測定結果	97
5.4	今後の展望	100
5.5	まとめ	100
第 6 章	結論	101
	謝辞	106
	参考文献	107
	研究業績	115

第1章 序論

1.1 はじめに

本章では、本論文で取り上げる液晶を用いた高周波応用に関して、まず液晶装荷高周波デバイスの開発背景について述べ、液晶の概要について説明する。次に、各種高周波線路および液晶を用いるマイクロ波ミリ波伝送線路の構造について説明し、テラヘルツ波領域において液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の開発を提案する。最後に本研究の目的および論文の構成について説明を行う。

1.2 液晶装荷高周波デバイスの開発背景

無線技術分野ではマイクロ波やミリ波、テラヘルツ波といった高周波の電磁波を応用した代表的な分野として通信とレーダがあり、それぞれ通信方式およびレーダ方式の高度化と高周波回路の高性能化とともに発展してきた。通信分野においては携帯電話やインターネットの利用が進むにつれて、人々はいつでもどこでもすぐに連絡や情報交換などのやりとりができる。スマートフォンの普及により画像伝送が一般的となり、国内だけではなく遠い海外で留学や仕事をしても家族と音声通話はもちろん、お互い顔の表情を見ながら会話できる時代となっている。一方、レーダ分野においては気象予報や災害予防の応用または自動車、船舶や飛行機などの乗り物が安全かつ円滑に運用できるように航空機管制や海上航海用レーダおよび自動船用レーダ[1-4]などが開発されている。また、軍事分野においても相手の動きを探知するため、様々なレーダの種類が使用される。

このように多くのメディアやチャンネルによる情報サービスがさまざまな伝送経路を通して多くのユーザーに配信されるようになった。伝送経路における無線環境の変化や伝送方式の交換は多種多様であり、その変化に柔軟に対応してシームレスに所望の伝送線路を選択し、受信できるようなアダプティブ技術が重要となってくる。ベースバンドや IF(中間周波数)帯においてはロジック素子やコンピュータによるソフトウェア無線技術により、アダプティブ技術がす

で実現されている[5-8]が、マイクロ波やミリ波帯といった高周波においてはコンピュータの処理速度の限界から実現は難しい。そこで、マイクロ波ミリ波、テラヘルツ波帯のアダプティブ技術として振幅、位相、周波数をアダプティブに変化させることができるデバイスを開発し、これらを制御する方法が研究されている。このデバイスを電子的に制御することで、ハードウェアによる高周波アダプティブ技術が実現できる。具体的に透磁率や誘電率を変化させることで伝送線路の伝送特性を変化させることができる。磁性体を用い、透磁率を変化させる代表的な例として、静磁波を用いた可変遅延線[9-17]、可変発振器[18, 19]、非線形応用の S/N エンハンサ[20]などが研究されている。

移相器の位相を変化させ、可変移相器を実現するためには透磁率を変化させる方法と電磁波の伝送路の長さを変える方法がよく知られている。透磁率を変化させる方法の例としてフェライト移相器のように、伝送路に挿入してフェライトに印加するバイアス磁界を変化させることにより透磁率 μ を変化させるものが利用されている。一方、電磁波の伝送路の長さを変化させる方法の例として長さの異なる伝送路を 2 つ並列に設けて、ピンダイオードやショットキーバリアダイオードなどの半導体素子を用いて電磁波の通る経路を変えるものなどが知られている。しかしながら、高周波帯におけるフェライトを用いた移相器は、伝送路内に挿入したフェライト内を伝搬する高周波の速度の変化により位相を変える特性を利用しているため、フェライト内を伝搬する高周波の損失が大きいかつ外部磁界を作るための保持電流が大きく、消費電流が大きという問題などがある。また、半導体素子移相器において、ピンダイオードなどの半導体素子を用いるものも、その挿入損失が大きく、特に 12 GHz 以上の高周波では損失が大きくなって適しない。また、半導体素子の場合も駆動電圧を印加し、順方向では電流が流れるため、消費電力が大きくなるという問題などがある。

一方、物質の誘電率を制御し、これを変化させることにより伝送特性を変化させることができる高周波媒体のひとつとして液晶が注目されている[20-24]。液晶は数 GHz から数百 GHz の周波数領域において、ほぼ一定の誘電異方性を有するため広帯域で使用することが可能である。高周波領域では、伝送線路を利用することが一般的であるが、その伝送速度は伝送線路の電磁波が存在する誘電体の誘電率に依存することから、誘電率を制御することにより伝搬遅延位相を制御することができる。高周波領域において、誘電率を容易に制御できる点におい

て液晶は非常に有利であり、液晶を使用することにより比較的容易に移相器を実現可能であることがわかる。高周波領域において、液晶による損失がほとんどなく、液晶分子の配向方向を制御するためにわずかな駆動電圧しか必要がないため消費電力も比較的小さいからフェライト可変移相器などに比べて液晶が非常に優れた誘電体材料である。これまで液晶は主にディスプレイや光シャッターなどのような光学デバイスに広く応用されている[25-30]が、上述した液晶の特徴を利用することで、磁性体を用いた手法よりも簡単な制御系であるため液晶をマイクロ波ミリ波帯で用いられる伝送線路に装荷した研究が多く行われている[31-41]。例を挙げると導波管にネマティック液晶を充填したマイクロ波ミリ波帯可変移相器[24, 31]、マイクロストリップライン (Microstrip Line: MSL) にネマティック液晶を用いたマイクロ波ミリ波帯可変移相器[32, 42] および可変遅延線[43]、コプレーナ線路 (Coplanar Waveguide: CPW) にネマティック液晶を用いたマイクロ波ミリ波帯可変移相器[44]等が報告されている。

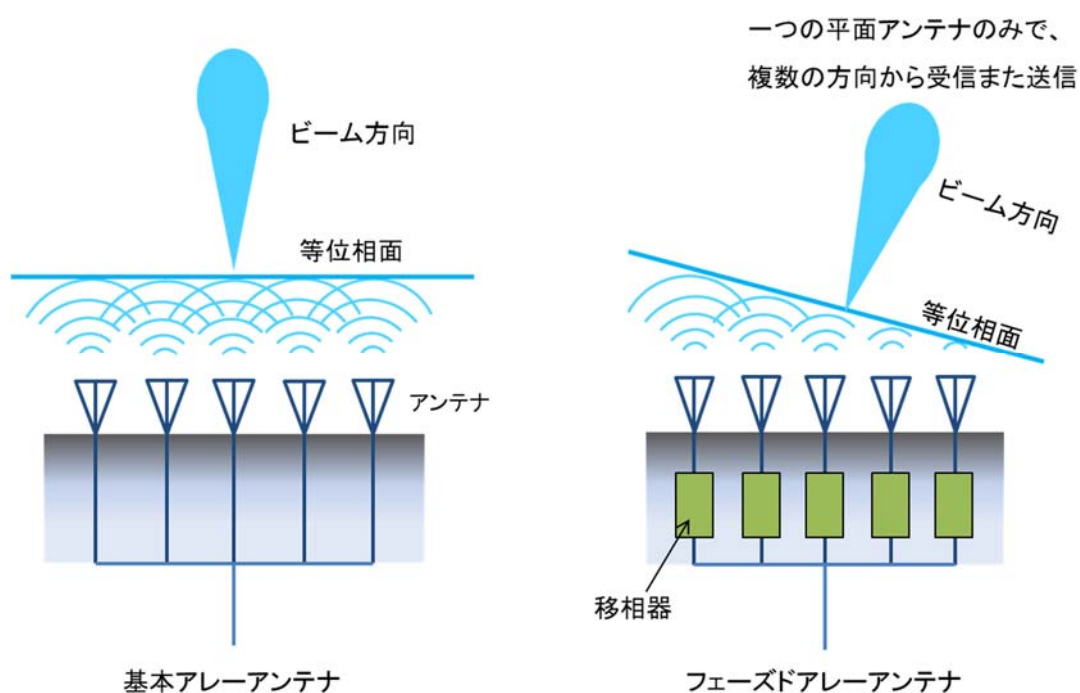


図 1.1 一次元フェーズドアレーアンテナ

これらの移相器をアレーアンテナに挿入することによりフェーズドアレーアンテナを実現できる。アレーアンテナとは、複数のアンテナを並列に配置し、各アンテナからの出力を合成することにより、利得向上を図るものであり、フェー

ズドアレーアンテナでは状況に応じその指向性を変化させることが可能である。図 1.1 は一次元のフェーズドアレーアンテナの概要を示しており、給電位相の制御により、アンテナを配置した面内でビーム方向を制御することができる。一方、二次元にアンテナ素子を配置したフェーズドアレーアンテナは、任意の方向にビームを制御することが可能であり、これまで利用されてきたパラボラアンテナ等に替わる平面アンテナとしてレーダー用のアンテナとして用いられる [45-48]。一方、レーダー以外にもフェーズドアレーアンテナはマルチパスフェージング抑圧のため、移動体における地上デジタル放送受信 [49-51] 等での利用が検討されてきた。衛星放送の受信において、複数の衛星からのサービスを受信するためには、複数の受信アンテナを利用することが一般的であるが、フェーズドアレーアンテナを利用することでアンテナの方向を調整する必要がなくなり、一つのアンテナで複数の衛星放送のサービスを受信することが可能になる。

1.3 液晶の概要

1.3.1 液晶発見の歴史

1888 年オーストリアの植物学者ライニッツアはコレステロールと安息香酸のエステル化合物物質の融点を測定するため、加熱して様子の変化を観察していたところ、固体(結晶)から液体へと変化する際に二段階の状態を経ることを発見した。

通常、物質が融解する温度である「融点」は、一つの物質に一つしか存在しないが、この安息香酸エステルは 144.5℃で結晶から白く濁った粘性のある液体状になり、178.5℃で透明でさらさらとした液体へと変化した、翌 1889 年ドイツの物理学者レーマンは、ライニッツアからの手紙をきっかけに、加熱装置付の偏光顕微鏡を作り、この安息香酸エステルを観察したところ、二つの融点の間の温度域において、「複屈折」という効果を示すことを発見した。「複屈折」とは、全方位光が一軸性結晶構造の物質を通過する際に、二つの直交した偏光に分かれる効果であり、結晶の持つ性質である。このことから液晶が液体と結晶の両方の性質を持つことが確かめられた。

液晶は発見されてから長くの間は物理的・化学的な主に学問的な興味で研究が行われてきた。しかし、1960年代に入り、液晶に電界を印加することにより、光を制御することが可能であるという研究が行われ、応用的な興味からも研究が行われるようになった。1970年代の液晶パネルのTN式、そして1990年代からのTFT-LCDなどの研究が次から次に報告された。既に130年以上が経過したが今日でも、新たな液晶の発見やデバイスの開発が続けられている。

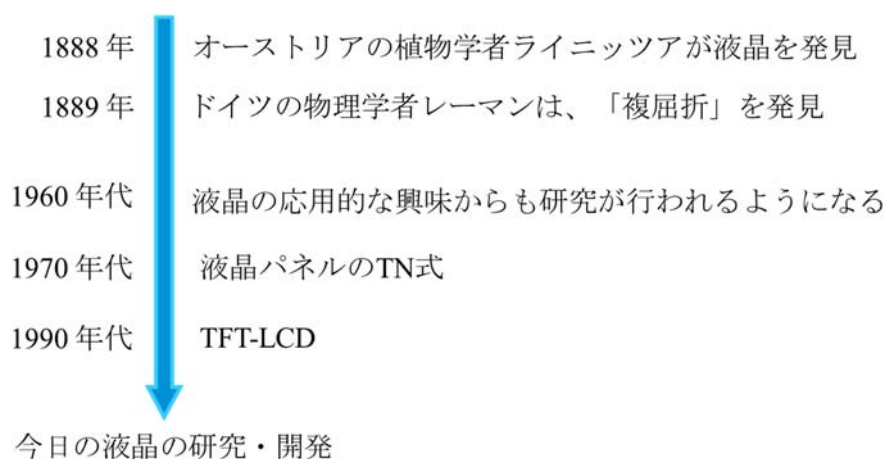


図 1.2 液晶発見の歴史の概要図

1.3.2 液晶の基礎

液晶は、物質の三状態である気体・液体・固体の三つに分類されない四つ目の状態である。気体と液体は密度によって分類され、液体と固体では、流動性と異方性により分類される。液晶は、液体と固体の中間状態であり、液体の持つ流動性と固体の持つ異方性をあわせ持つことから英語で liquid crystal (液体結晶) と命名され、日本語ではそれを略して液晶と呼ばれている。液晶はいくつかの種類に分類され、かつ同じ物質でも温度などの条件を変えることにより、数種類の液晶相を示すものもある。

液晶は、一般的には棒状の分子あるいは板状の分子から構成されており、異方性と流動性を兼ね備えている物質である。しかし、異方性は液晶の分子の構造、分子間相互作用、分子配列によって多様である。また流動性についても極めて粘度が低くさらさらと流れるものから、非常に粘度が高く、中には固体と識別が容易でないものもあるなどの様々な液晶が存在する。

1.3.3 液晶の分類

液晶を大別するとネマティック (nematic) 液晶、スメクティック (smectic) 液晶、コレステリック (cholesteric) 液晶の三つに分類される。これらの配向の様子を図 1.3 に示す。図 1.3(a) に示すネマティック液晶は分子の長軸方向が揃うのみで重心に関しての秩序は存在しない。配向方向が揃っているといっても分子の全てが完全に平行ではなく、局所領域を見れば、ほぼ同一方向を向いているといった方が良い。そこで、液晶分子の大きさに比べれば十分に大きな領域を考え、その中での平均的な分子の配向方向を単位ベクトル n を用いて表し、これをダイレクタまたは配向ベクトルと定義する。ネマティック液晶の分子の多くは細長い分子であり、長軸方向のみが揃っているが、分子の位置関係、すなわち重心はランダムである。

一方、図 1.3(b) および図 1.3(c) に示すスメクティック液晶は層構造をしており、液晶分子のチルトの有無、層内での分子の秩序、層間での秩序の有無により細かく分類されている。代表的なものとしては、図 1.3(b) に示す層内での分子の

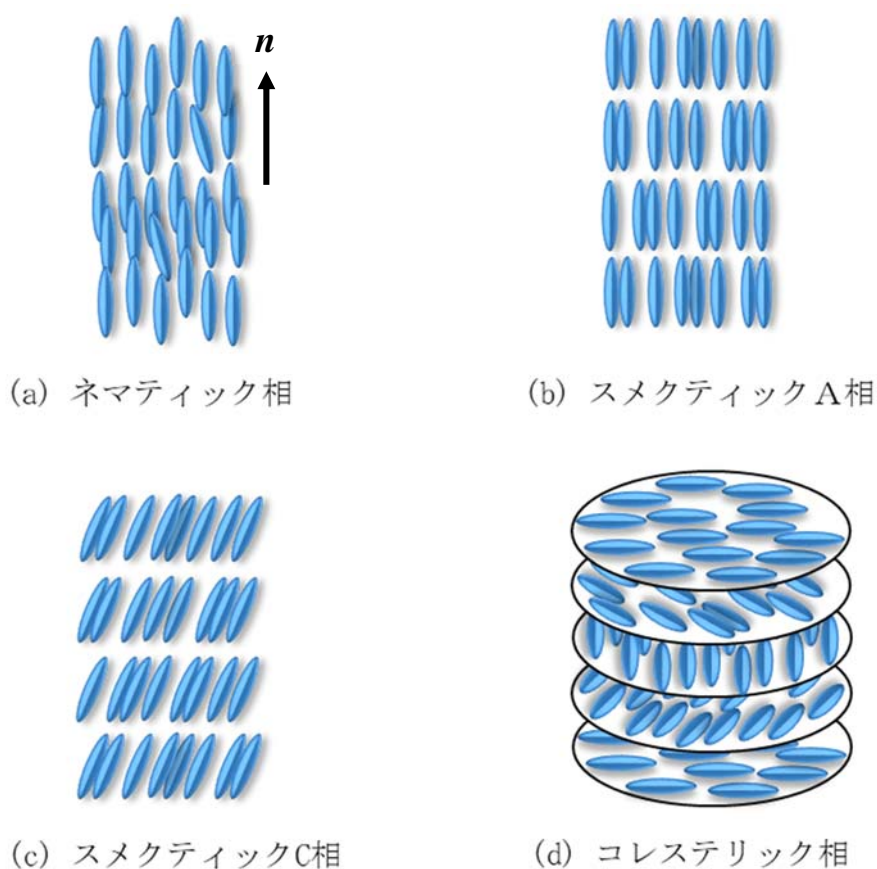


図 1.3 液晶の種類

位置に秩序が存在せずに、分子の長軸方向が層法線方向を向いているスメクティック A (SmA) 相や、図 1.3(c)に示す分子の位置の秩序は SmA 相と同じであるが、分子長軸の方向が層法線方向からある角度だけ傾いているスメクティック C (SmC) 相などがある。また、図 1.3(d)に示すように、コレステリック液晶は層構造をとるが、分子の長軸は各層で層内面にあり、互いに平行に配向しており、しかも層ごとにその配向方向が回転し螺旋構造をとる。なお、本研究で行った実験は全て図 1.3(a)に示すネマティック液晶を用いて行った。その理由について、1.3.4 節でネマティック液晶の特性を説明することを通じて述べる。

1.3.4 ネマティック液晶

ネマティック液晶は液晶の中でも最も粘度が低く流動性が大きいこと、水等の液体と同様に簡単に流すことができることや、入れ物の形状に合わせて形を変えることができるといった特徴がある。ネマティック液晶は分子の重心位置について長距離的な秩序を持たず、配向に関して短距離的秩序のみを持つ。液晶は一般的に単一の分子のみで発現する場合と、数種類の化合物を混合した系で発現する場合がある。研究以外の応用分野では、単一の液晶材料が用いられることは少なく、液晶状態を取る温度範囲や誘電異方性、弾性定数、さらには粘性等を最適な状態とするために、数種類以上の化合物を混合(ブレンド)したものが用いられる [52-54]。液晶は棒状分子からなるため、力学、電気、磁気および光学特性に大きな異方性が存在する。ネマティック液晶を用いたデバイスでは、複屈折、誘電異方性、弾性定数や回転粘度がデバイスの動作特性に大きな影響を与える [55-58]。弾性定数と回転粘度は液晶デバイスの動作電圧と応答時間の測定から決定することが可能である [59, 60]。一方、複屈折と誘電異方性は液晶デバイスの光学および電気特性を決め、通常は高い複屈折と大きな誘電異方性を持つネマティック液晶材料が望ましい [61-64]。

1.3.5 液晶分子と電界の相互作用

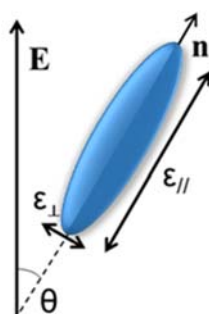


図 1.4 液晶分子の電界相互作用と方向に依存する比誘電率

液晶はその多くが棒状分子からなるため、誘電率に大きな異方性が存在する。図 1.4 に示すように、液晶分子のダイレクタ方向の誘電率を ϵ_{\parallel} と、ダイレクタ方向と垂直な方向の誘電率を ϵ_{\perp} とし、この液晶分子が電界 E 中におかれた場合のエネルギーを考えてみる。このうち、ダイレクタ方向の向き n に依存するエネルギー f_d は、

$$f_d = -\frac{1}{2}\epsilon_0\Delta\epsilon(\mathbf{n}\cdot\mathbf{E})^2 \quad (1.1)$$

となり、この f_d が最小となるように液晶分子は配列する。ここで、 $\Delta\epsilon$ は誘電異方性であり、 $\Delta\epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$ で表される。式(1.1)からわかるように f_d が最小になるのは、 $\Delta\epsilon > 0$ のときには n と E が平行の場合であり、 $\Delta\epsilon < 0$ のときには n と E が垂直の場合である。言い換えれば、誘電異方性 $\Delta\epsilon$ が正の材料ではダイレクタ n は電界 E に平行な方向に、 $\Delta\epsilon$ が負の材料ではダイレクタ n は電界 E に垂直な方向に、それぞれ液晶分子が配向することになる。誘電率は電界に対する分極の大きさを意味するものであるが、その分極には電子分極、原子分極、イオン分極および配向分極がある。その中で液晶の誘電率に主に寄与するのは、電子分極による誘電率 ϵ_e と永久双極子モーメントによる誘電率 ϵ_d である。したがって、液晶の誘電異方性 $\Delta\epsilon$ は、電子分極の誘電異方性 $\Delta\epsilon_e$ 、配向分極の異方性 $\Delta\epsilon_d$ により、

$$\Delta\epsilon = \Delta\epsilon_e + \Delta\epsilon_d \quad (1.2)$$

と表される。このとき分子の形状から $\Delta\epsilon_e$ は必ず正の値をとるが、 $\Delta\epsilon_d$ は分子内の永久双極子モーメントの向きに依存するため、材料によりその符号は異なる。

また、同じ材料でも温度や周波数によって符号や大きさが異なることから、誘電異方性 $\Delta\epsilon$ は液晶材料の経緯・温度および周波数によってその符号や大きさが異なる。

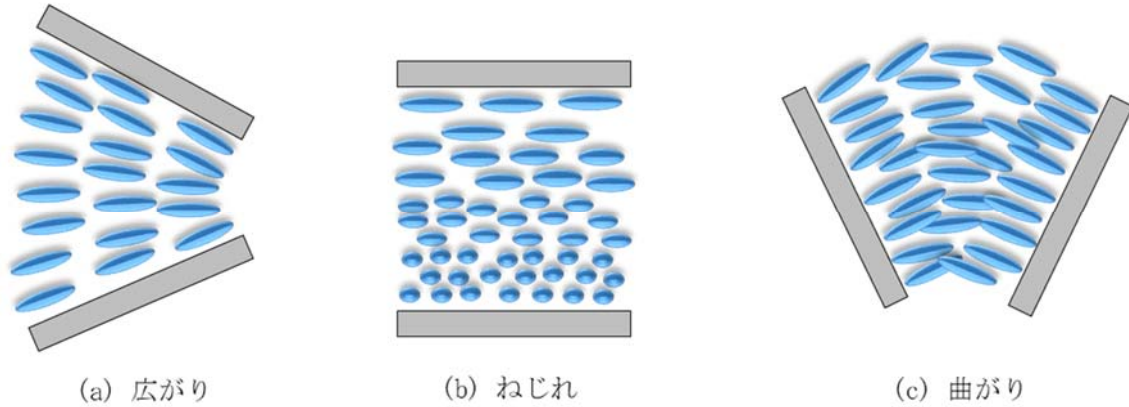


図 1.5 配向場のひずみ

次に、フランクの自由エネルギーと呼ばれる式を式 1.3 に示す[56, 65, 66]。

$$f = \frac{1}{2} K_{11} (\nabla \cdot n)^2 + \frac{1}{2} K_{22} \{n \cdot (\nabla \times n) + q_0\}^2 + \frac{1}{2} K_{33} \{n \times (\nabla \times n)\}^2 - \frac{1}{2} \epsilon_0 \Delta\epsilon (E \cdot n)^2 \quad (1.3)$$

式 1.3 の K_{11} 、 K_{22} 、 K_{33} はそれぞれ図 1.5 に示す広がり、ねじれ、曲がり変形に対応する液晶の弾性定数であり、フランクの弾性定数という。まず、もっとも簡単な図 1.5(b)のねじれ変形について考えると、式 1.3 は

$$f = \frac{1}{2} K_{22} (n \cdot \nabla \times n)^2 - \frac{1}{2} \epsilon_0 \Delta\epsilon (E \cdot n)^2 \quad (1.4)$$

と表すことができる。さらに式 1.4 を解いていくと、バイアス印加直後の閾値電界は

$$E_c = \frac{\pi}{d} \sqrt{\frac{K_{22}}{\epsilon_0 \Delta\epsilon}} \quad (1.5)$$

となる。同様に、図 1.5(a) および(c)の広がり、曲がり変形について考えると、式 1.3 は

$$f = \frac{1}{2} K_{11} (\nabla \cdot n)^2 + \frac{1}{2} K_{33} \{n \times (\nabla \times n)\}^2 - \frac{1}{2} \epsilon_0 \Delta\epsilon (E \cdot n)^2 \quad (1.6)$$

と表せる。さらに、この式を解いていくと、バイアス電圧印加直後の閾値電界については

$$E_c = \frac{\pi}{d} \sqrt{\frac{K_{11}}{\epsilon_0 \Delta \epsilon}} \quad \text{および} \quad E_c = \frac{\pi}{d} \sqrt{\frac{K_{33}}{\epsilon_0 \Delta \epsilon}} \quad (1.7)$$

と表すことができる。式 1.5 および式 1.7 より、液晶層厚 d 以外はすべて液晶材料によって決定するため、閾値電界は層厚にのみ依存することが分かる。

1.4 液晶を用いるマイクロ波ミリ波伝送線路

図 1.6 に示すように高周波領域において信号を伝送するため、主に同軸ケーブル、方形導波管、円形導波管などの伝送線路が用いられる。本研究では、マイクロ波ミリ波領域においてはコプレーナ線路 (Coplanar Waveguide: CPW) 型移相器とマイクロストリップライン (Microstripline: MSL) 型移相器について研究を行った。また、新しい周波数領域としてテラヘルツ波領域においては NRD (Non-Radiative Dielectric: NRD) ガイド型移相器について研究を行った。

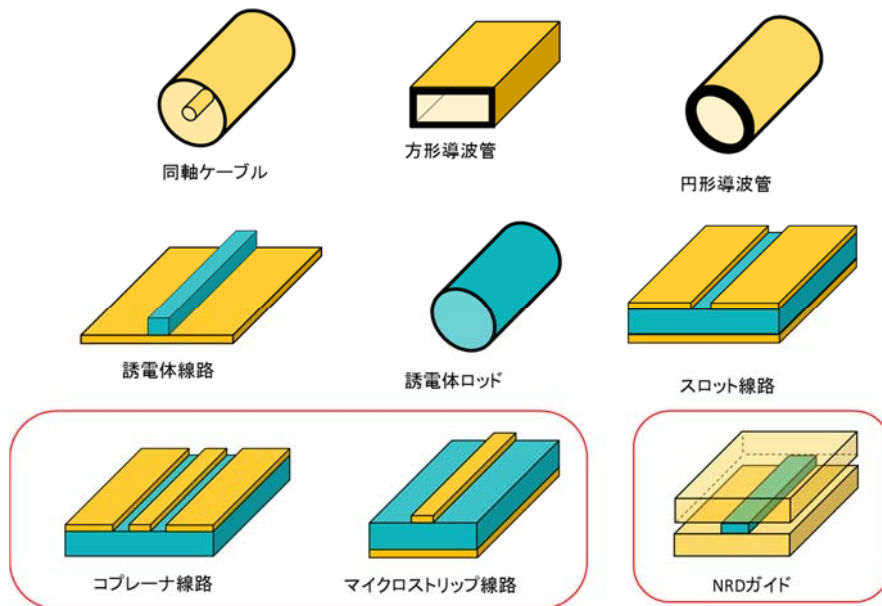


図 1.6 各種マイクロ波からテラヘルツ波領域の伝送路

マイクロ波ミリ波帯といった高周波帯では、信号を伝搬させるために伝送線路が用いられる。その中で最も多く用いられる伝送線路は MSL あり、その構造を図 1.7(a) に示す。一般的な MSL では接地導体を含めて 2 個以上の導体が平行にあり、それらが同一媒質中ではなく空気と誘電体のように、2 種類の媒質に線路がある場合は同軸線路のような TEM モードにはならないことが知られている

[67, 68]。基本 MSL の電磁界分布を図 1.7 (b)に示しており、周波数が低い場合には電磁界分布を断面に持ち、TEM 波に近いモードとなる。周波数はゼロである場合、すなわち直流の場合には完全に電界も磁界も全て中心導体線路に垂直な面内にある TEM モードとなる。一方、周波数が高くなると誘電体基板上に表面波を励起し、この表面波モードと結合するため、電磁波の進行方向に電界および磁界成分を持つハイブリッドモードとなる。実際に使用する場合、表面波とのモード結合による損失を避けるため、結合の少ない周波数で使用するため、ほぼ TEM 波として扱い、準 TEM モードと呼ぶ。さらに、回路への組み込みやすさなどから MSL が用いられる機会は多くなっている。構造的には裏面に接地導体を形成し、表面に線状の中心導体線路を形成し、中心導体線路と接地導体との間に誘電体が挟まれており、この部分にのみ誘電体が存在する構造となっている。

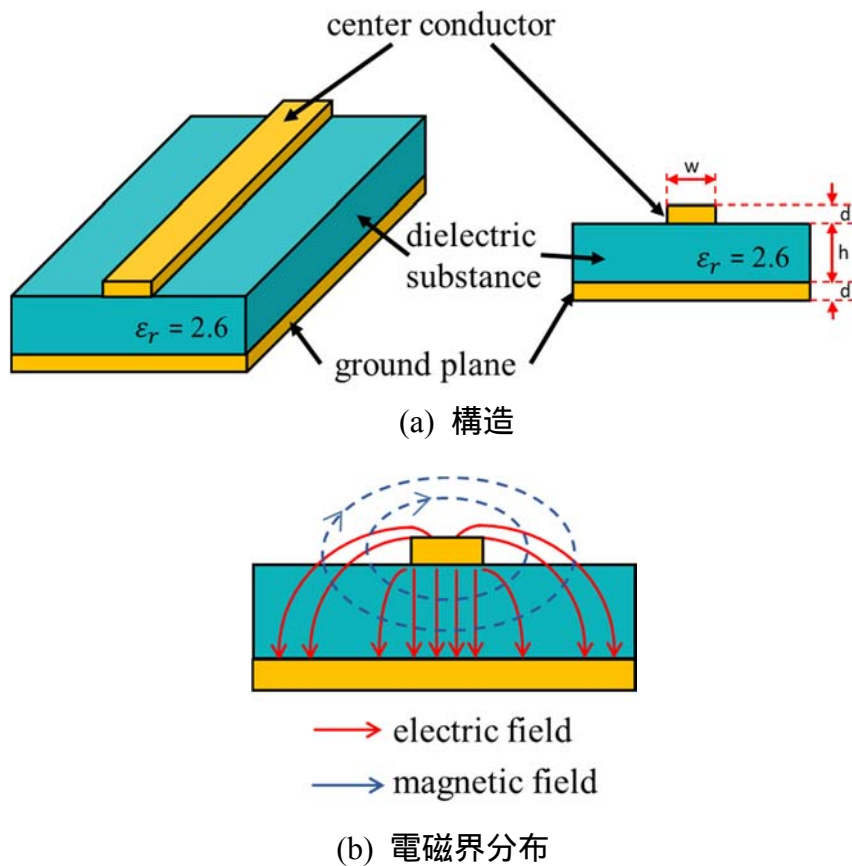


図 1.7 基本 MSL の構造と電磁界分布

一方、図 1.8(a)に示すように板状高周波誘電体基板の表面の中央部に線状の導体箔を形成し、この中心導体線路に電磁波を伝達させる伝送線路が CPW である。このとき、中心導体線路の両端に線状の空隙部を設け、その外側に接地導体

を作製する。これにより中心導体線路と接地導体が同一平面上に存在することになり、図 1.8 (b)に電磁界分布を示すように、中心導体線路から接地導体に向かう電界によって電磁波が伝送する。CPW 線路においても MSL と同様に伝送モードは準 TEM モードである。

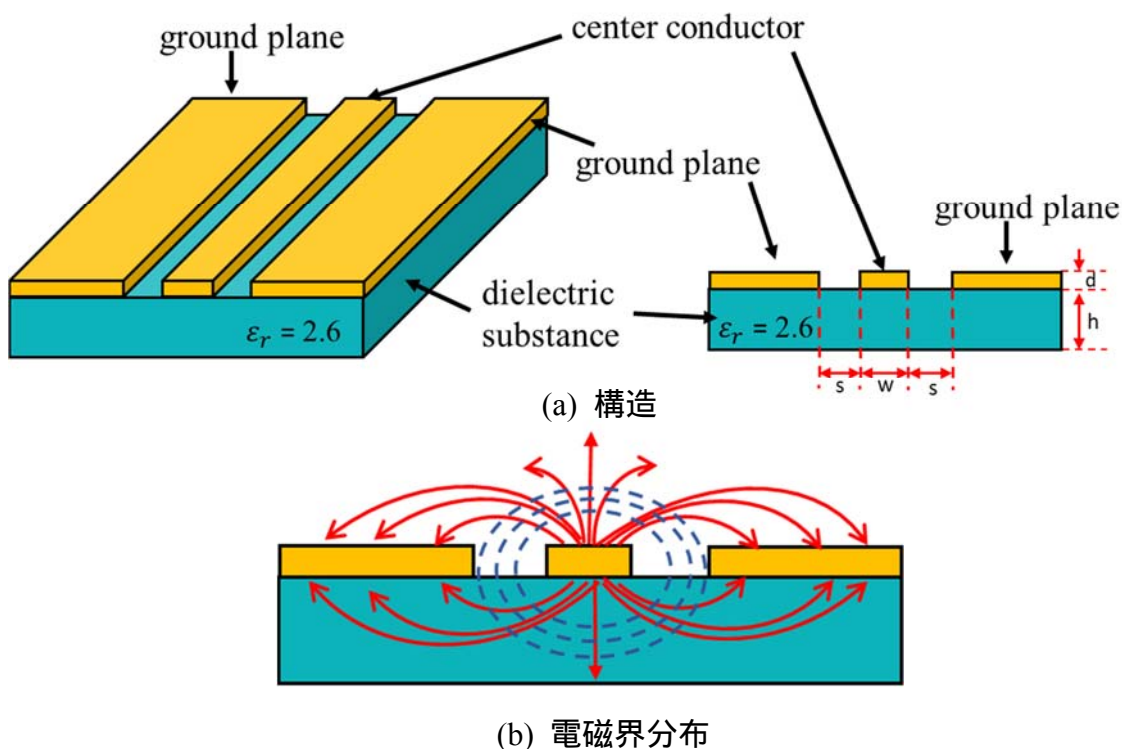


図 1.8 基本 CPW の構造

伝送線路に伝搬させる信号の速度や実効波長は伝送線路における実効誘電率により決定される。また、伝送線路の実効誘電率は伝送線路が構成される媒体や伝送線路構造により決められるため、媒体と断面構造が伝送線路の重要なパラメータの一つとなっている[47]。伝送線路の実効誘電率を変化させることにより実効波長も変化し、線路に伝搬させる信号の遅延位相も変化する。MSL と CPW は平面構造を持つことから、液晶を比較的容易に装荷できる。そのため、液晶としてネマティック液晶を用い、伝送線路として CPW または MSL を用いた液晶装荷 CPW 型または MSL 型マイクロ波ミリ波移相器を中心に研究されている。

1.5 液晶を用いるテラヘルツ波伝送路の提案

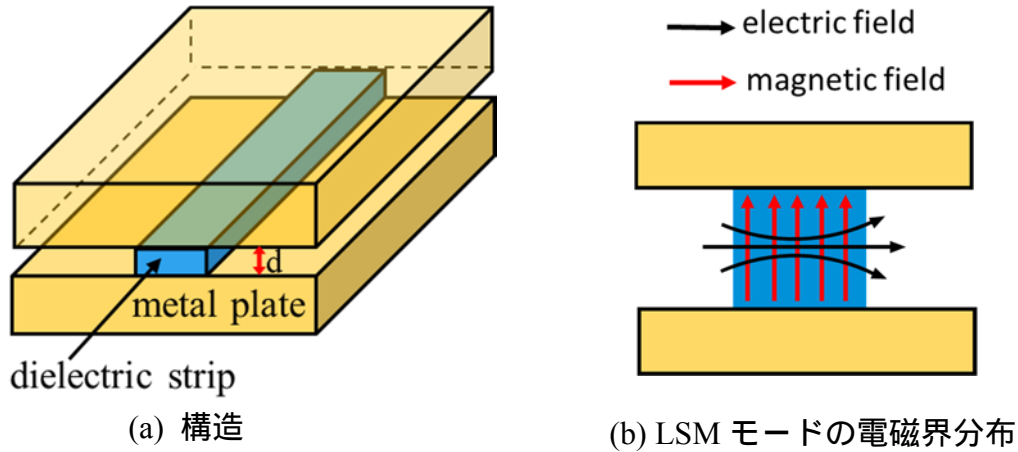


図 1.9 NRD ガイドの構造と LSM モードの電磁界分布

現状の通信環境では通信量の増加、周波数帯域の飽和による混信が発生し、通信障害等も頻繁に起きているため、新たな周波数領域としてテラヘルツ波帯が検討されている[69, 70]。テラヘルツ波領域は未開拓周波数領域と言われ、今まで用いられる周波数領域と比較すると、数十倍以上も高い周波数領域の電磁波である。そのため、テラヘルツ波の制御が非常に困難であるが、通信機器に応用された場合、更なる大容量かつ高速通信が可能になる。1.4 節で説明した CPW あるいは MSL のようなプリント基板の伝送線路においては、テラヘルツ波のような高い周波数領域では伝送損失は著しく大きいと報告されている [71]。一方、NRD ガイド型伝送線路は高周波領域において、プリント基板に比べて格段に低損失である。さらに、一般の誘電体線路と比べ、NRD ガイドは線路の曲がりや不連続部分では不要な放射波が発生しないという特徴がよく知られている。

図 1.9 (a) に示すように、NRD ガイドの構造は一般的に 2 枚の金属板の間に誘電体が挟まれる構造となっている。一般に、2 枚の平行平板金属板に誘電体を挟み込んだ構造の伝送路の動作モードは TE モード(Transverse Electric Mode)、LSE モード(Longitudinal Sectional Electric Mode)および LSM モード(Longitudinal Sectional Magnetic Mode)の 3 種類があるが、本研究に図 1.9 (b)に示す NRD ガイドの動作モードとして機能する LSM モードを使用する。このように、本研究において、今までに、主にミリ波帯で研究された NRD ガイドの優れた特徴を利用して、NRD ガイドの固体誘電体部分の代わりに液晶を用い、はじめて液晶装荷

NRD ガイドを提案し、テラヘルツ波領域における液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器を実現することを検討する。

1.6 本研究の目的

一般的に光デバイスとして用いられる液晶層の厚さは $5\ \mu\text{m}$ 以下と薄いものがほとんどである。例えば、図 1.10 に液晶パネルの構造を示すように、2 枚のガラス基板の間に液晶層が挟まれたサンドイッチ構造となっている。液晶層の厚さは約 $5\ \mu\text{m}$ で髪の毛の太さのわずか 10 分の 1 であり、極めて薄いものである。このデバイスに駆動電圧を印加した際の立ち上がり応答時間はもちろん、駆動電圧を除去した際の立ち下がり応答時間も極めて短く、実際デバイスの応用上大きな問題はない。さらに、デバイスを動作させるための電圧が数 V 程度しか必要がなく、電流も液晶の配向を変化させるときのみ流れるため、消費エネルギーの点でもネマティック液晶は非常に優れた材料である。

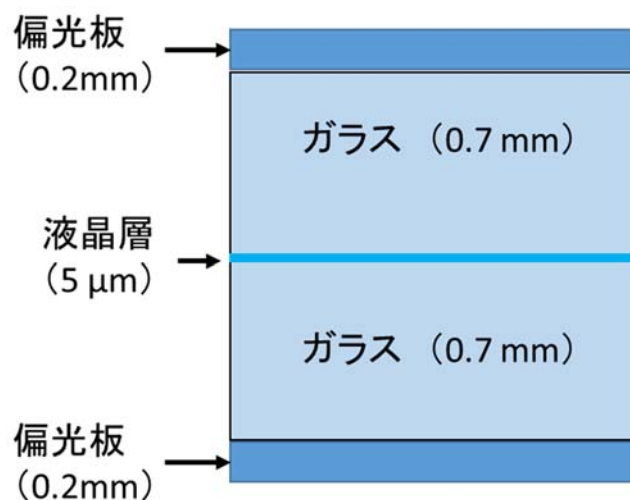


図 1.10 液晶パネルの断面

それに対して、ネマティック液晶装荷マイクロ波ミリ波デバイスまたはテラヘルツ波デバイスにおいては、液晶層厚が薄ければ薄いほど導体損による挿入損失が増大することが知られており、液晶ディスプレイや液晶パネルなどのような薄い液晶層厚を用いることはできない。そのため、マイクロ波やミリ波、テラヘルツ波デバイスでは多くの場合は液晶層の厚さは数十 μm ~ 数百 μm 以上で構成されることがほとんどである。しかし、液晶分子の立ち下がり応答時間は液

晶層厚の 2 乗に比例して増加するため、立ち下がり応答時間が数秒～数百秒と長くなり、立ち上がり応答時間の 100 倍以上になってしまい、アダプティブデバイスとして使用する際の応答時間の長さなどが問題となってくる[72]。この問題を解決するため、ネマティック液晶を用いたマイクロ波ミリ波デバイスにおいて、ネマティック液晶に少量の重合性モノマーを添加し、液晶相において紫外線照射することにより重合した高分子安定化ネマティック液晶 (Polymer Stabilized Nematic Liquid Crystal: PSNLC) の利用が検討されている[73, 74]。この改善方法について簡単に説明すると、液晶層内に高分子のネットワークを形成し、液晶層内に境界面を複数持たせることで実質的に層厚を薄くしたものと同様の効果を得ることができ、それにより立ち下がり応答時間の改善を図るものである。過去の研究結果をまとめると表 1 のようになる。これまでの研究成果により、マイクロストリップライン (Microstrip Line: MSL) 構造に用いられる不透明な誘電体基板でも適用が可能な熱重合型の PSNLC では、立ち下がり応答時間を減少できたが約 46 s 程度であり、応答時間が改善されたと言ってもまだ非常に長いと言える。また、テストセルである ITO ガラス平行平板液晶セルにおける光重合型との比較により応答時間の改善度が低いなど、均一な高分子ネットワークの形成が困難であり、熱重合型 PSNLC の利用が困難であることがわかった。

一方、高周波線路と接地導体が同一平面上にあるコプレーナ線路を伝送線路とし、液晶の上部基板にガラス基板を用いることにより、上部基板から紫外線照射による重合が可能な構造とした。このとき、表 1 にも示すように、立ち下がり応答時間を 1 s 以下に改善されたことを確認できた。しかし、高周波電界の半分

デバイス	過去の研究成果	
	熱重合型PSNLC	光重合型PSNLC
液晶装荷CPW型移相器	未実施	1 s 以下
液晶装荷MSL型移相器	45.9 s 以下	未実施

表 1 過去の研究成果

以上が液晶以外の部分を透過するため、位相変化が小さくなるなどの問題がある[75]。そこで本論文では、光重合型の PSNLC を取り上げ、CPW 型移相器の特性を明らかにするとともに MSL 型移相器の構造を見直すことにより、はじめて液晶中への紫外線照射による重合が可能な液晶装荷 MSL 型移相器の構造を提案し、光重合型 PSNLC 装荷 MSL 型移相器の応答改善を検討する。

さらに、ネマティック液晶を用いたテラヘルツ波デバイスにおいて液晶層を単純に薄くする方法や二周波駆動の改善方法や液晶/ナノファイバー複合体の使用による改善方法などがある。二周波駆動の改善方法を簡単に説明すると誘電異方性が正の液晶に電界を印加すると液晶分子が電界方向に配向するが、電界を除去した際にはアンカーリング力が働き、液晶分子を初期配向へ再配向させる。このとき、液晶分子は電界の影響を受けないため、電界を印加した際と比べ応答時間が非常に長い。そのため、積極的に電場を印加することで、初期の配向状態へ戻すことが出来ればより短い応答時間を得ることが出来ると考えられる。また二周波駆動液晶の誘電異方性($\Delta\epsilon$)は、低周波電場下では正、高周波では負となる。そこで上記のような特性を実現するために、本研究では二周波駆動液晶ネマティック液晶を用いることが有効であると考えられる。

最後に、液晶/ナノファイバー複合体の使用による改善方法について簡単に説明する。液晶/ナノファイバー複合体を作製するために液晶層内にナノファイバーが導入される。このとき、ナノファイバーと接する液晶分子がアンカーリング力を受けることから実質的に液晶層厚がナノファイバーの間隔であるとみなすことができ、液晶層厚は薄くなったのと同様の効果が得られる。一般的な液晶を用いたときの立ち下がり応答時間は液晶層厚の 2 乗に比例すると知られており、ナノファイバーとの複合化により実質的な液晶層厚を減少させ、立ち下がり応答時間の改善を図るものである。

このように、マイクロ波やミリ波、テラヘルツ波の液晶装荷移相器について取り上げ、応答時間は 1s 以下を目標とし、各移相器の特性を研究しそれぞれの移相器に対して応答改善を図ることを本研究の目的とする。その際、各移相器の位相変化量を考察し、実際のデバイスに応用する際に 360° の位相変化量を実現する可能性を検討する。

1.7 論文の構成

論文の構成について、簡単に述べる。なお、本論文の構成の概略を図式化したものを図 1.11 に示す。

第 1 章では、研究の背景について述べ、液晶の概要を説明した。次に、晶装荷マイクロ波ミリ波伝送線路について説明し、テラヘルツ波領域において液晶装荷テラヘルツ波伝送路を提案し、最後に本研究の課題と目的および論文の構成について示した。

第 2 章では、マイクロ波ミリ波の伝送線路として液晶を装荷するマイクロ波ミリ波移相器である液晶装荷 CPW 型移相器および液晶装荷 MSL 型移相器の構造について説明し、位相変化原理を中心として動作原理について述べる。それぞれの特徴から液晶装荷マイクロ波ミリ波移相器として使用した場合の作製要領や特性への影響等を検討する。さらに、実際に作製した液晶単体装荷 CPW 型および MSL 型移相器の動作を確認し、それらの応答特性を検討する。

第 3 章では、液晶装荷 CPW 型および MSL 型マイクロ波ミリ波移相器の立ち下がり応答時間の改善方法として、光重合型 PSNLC を取り上げ、立ち下がり応答時間の改善の検討を行う。作製した ITO ガラス平行平板液晶セルを用い光重合型 PSNLC の重合性モノマー濃度による複素誘電率の駆動電圧依存性および過渡応答特性への影響等について実験で検討し、その測定結果から、第 2 章で検討した液晶単体装荷 CPW 型と MSL 型マイクロ波ミリ波移相器に、液晶単体の代わりに光重合型 PSNLC を導入した際の応答特性について検討する。

第 4 章では、テラヘルツ波および NRD ガイド型について説明し、液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の実現を提案する。次に、ネマティック液晶 5CB 装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の実験結果について説明する。

第 5 章では、まず二周波駆動液晶および二周波駆動の改善方法について説明し、ネマティック液晶 RDP-A4188 を用いて NRD ガイド型テラヘルツ波移相器および ITO 平行平板セルに装荷し、応答時間の改善を検討する。次に、ナノファイバーの作製および液晶 / ナノファイバー複合体による応答改善原理について説明する。最後に、ネマティック液晶 RDP-A3123 / ナノファイバー複合体を用いて液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の応答改善について検討する。

最後に、第 6 章では本論文をまとめる。

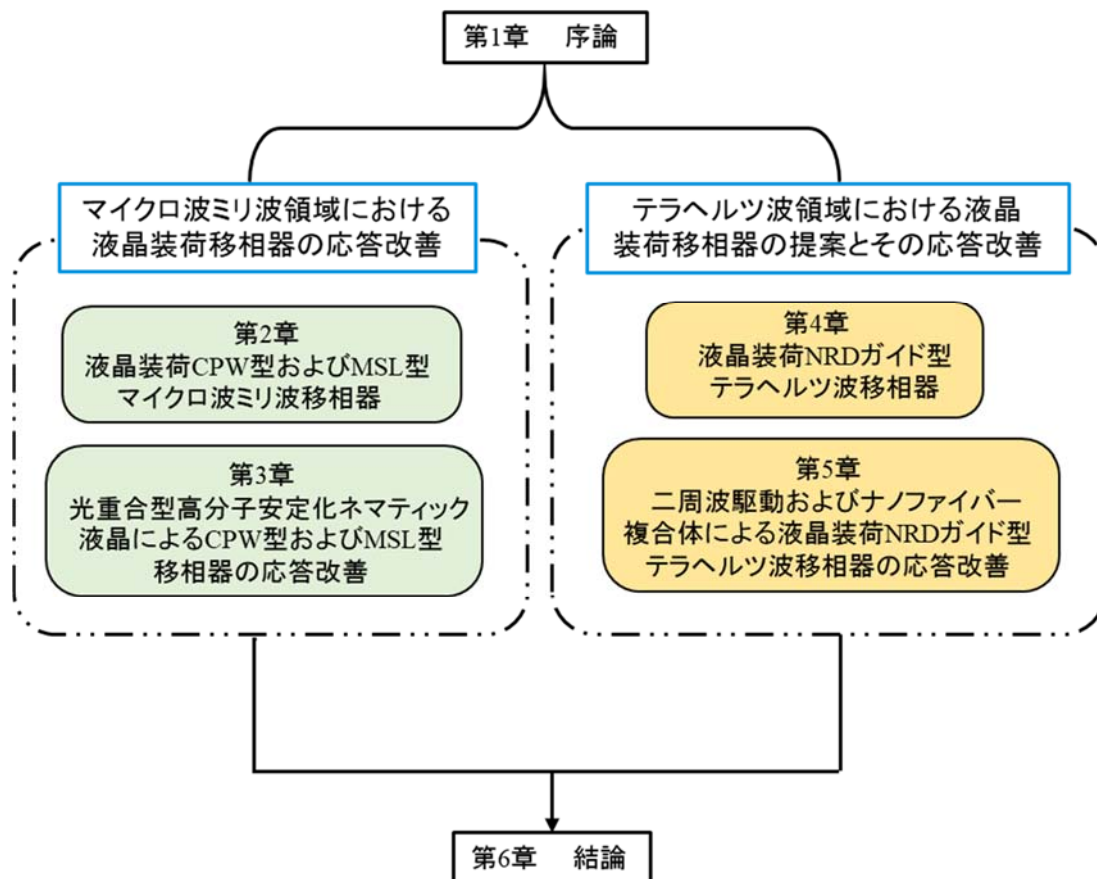


図 1.11 本論文の構成

第 2 章

液晶装荷 CPW 型および MSL 型 マイクロ波ミリ波移相器

2.1 はじめに

これまで液晶は主にディスプレイや光シャッターなどのような光学デバイスに広く応用されている[25-30]が、液晶分子は電界の影響で配向方向が変わるため、誘電率が簡単に制御され、磁性体を用いた手法よりも簡単な制御系である。また、マイクロ波ミリ波領域において、物質の誘電率を制御し、これを変化させることにより伝送特性を変化させることができるため、高周波媒体のひとつとして液晶が注目され、液晶をマイクロ波ミリ波帯で用いられる伝送線路に装荷した研究が多く行われている[31-41]。例を挙げると導波管にネマティック液晶を充填したマイクロ波ミリ波帯可変移相器[24, 31]、MSL にネマティック液晶を用いたマイクロ波ミリ波帯可変移相器[32,42]および可変遅延線[43]、CPW にネマティック液晶を用いたマイクロ波ミリ波帯可変移相器[44]等が報告されている。

本章では、マイクロ波ミリ波の伝送線路として液晶を装荷するマイクロ波ミリ波移相器である液晶装荷 CPW 型移相器および液晶装荷 MSL 型移相器の構造について説明し、位相変化原理を中心として動作原理について述べる。それぞれの特徴から液晶装荷マイクロ波ミリ波移相器として使用した場合の作製要領や特性への影響等を検討する。次に、駆動電圧が印加時の液晶装荷 CPW 型移相器および液晶装荷 MSL 型移相器の高周波電界の比較を行うとともに、本研究で用いるマイクロ波ミリ波測定系を説明する。最後に、実際に作製した液晶単体装荷 CPW 型および MSL 型移相器の動作を確認し、それらの応答特性を検討する。

2.2 液晶装荷 CPW 型移相器の構造・動作原理および作製方法

2.2.1 構造

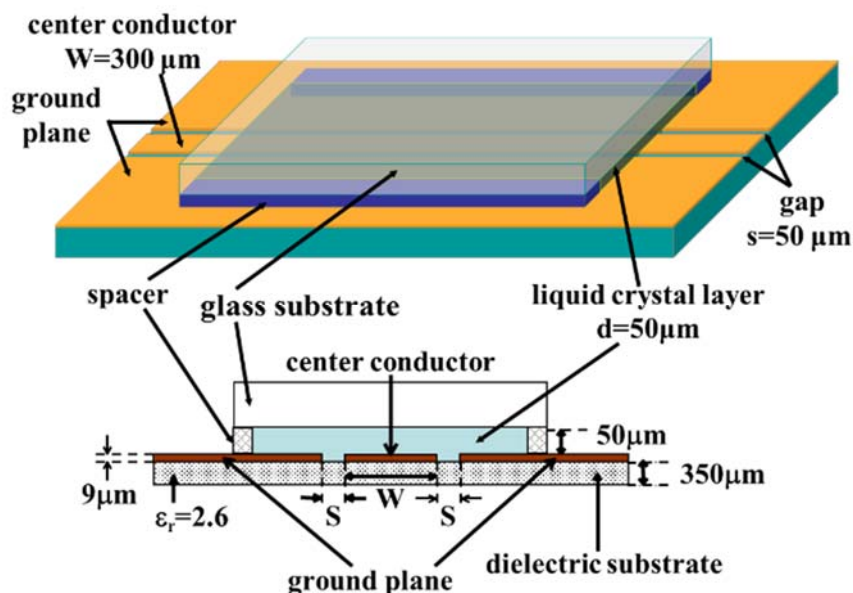


図 2.1 液晶装荷 CPW 型移相器の構造

液晶分子の配向方向を変化させることである方向の液晶の誘電率を変化させることができる。マイクロ波ミリ波領域において液晶を用いたデバイスでは、液晶を伝送線路に装荷し、外部から駆動電圧を印加することにより液晶の配向を制御することができ、伝送線路の特性を変化させることが可能である。これまで主に液晶装荷 CPW 型移相器また液晶装荷 MSL 型移相器を中心に研究されてきた[76-78]。

CPW 型伝送線路は、高周波誘電体基板の片側表面に中心導体線路と接地導体が配置された平面伝送線路の一つであり、主に伝送距離の短い集積回路内で使用されている。液晶装荷 CPW 型移相器の構造を図 2.1 に示す。液晶装荷 CPW 型移相器は上部基板と下部基板から構成される。下部基板は基本の CPW 型伝送線路であり、高周波誘電体基板により作製される。一方、上部基板はスライドガラス基板である。上部基板と下部基板の間に厚さ d の液晶層を挟み込むことにより液晶装荷 CPW 型移相器が実現される。液晶層との両界面には配向膜としてポリイミド膜が形成されており、液晶分子に初期配向を与えるため、CPW の伝送線路の伝搬方向と平行な方向にラビング処理が施されている。液晶装荷 CPW 型移相器において電磁界分布は同軸線路の分布と近いことから同軸線路との結

合は容易である。

液晶層の両境界面には導体線路方向にアンチパラレルラビング処理されたポリイミド膜が形成される。また、駆動電圧を印加するために外部回路が中心導体線路および接地面に接続されている。中心導体線路幅や導体線路と接地導体の隙間などの構造は特性インピーダンスを考慮して決定される。また、一般的な CPW では導体線路は空気中に露出しているが、液晶を使用した CPW 型移相器では導体線路の上部には液晶層があり、さらに液晶層を保持するため液晶層上部にスライドガラス基板や誘電体基板などを追加するため、これらが特性インピーダンスに与える影響も考慮する必要がある。

2.2.2 液晶装荷 CPW 型移相器の動作原理

図 2.2 に液晶装荷 CPW 型移相器の動作原理の概念図を示す。図 2.2(a)のように液晶への駆動電圧を印加しない場合、液晶分子は上部基板と下部基板の基板表面に施されたポリイミド配向膜の配向規制力により、導体線路に沿うように配向する。このとき、中心導体線路から放射される高周波電界は、液晶分子の短軸方向の誘電率 ε_{\perp} を感じることにになり、実効誘電率を $\varepsilon(0)$ とすると $\varepsilon(0)$ は ε_{\perp} と一致する ($\varepsilon(0) = \varepsilon_{\perp}$)。

一方、図 2.2(b)のように駆動電圧を印加した場合、中心導体線路と接地導体の間に電界が生じ、この電界は液晶に配向させる力が働くため、液晶分子はこれに沿って再配向する。この際、CPW 型移相器の高周波電界の方向は液晶分子の長軸方向とほぼ一致するため、高周波電界が感じる液晶層の比誘電率は長軸方向の比誘電率である ε_{\parallel} とほぼ一致する。その高周波電界の実効誘電率を $\varepsilon(V)$ とすると $\varepsilon(V) \approx \varepsilon_{\parallel}$ である。これより、液晶装荷 CPW 型移相器において駆動電圧を制御することによりマイクロ波ミリ波移相器が実現できる。

ここで、移相器の伝送線路長を l 、使用周波数を f 、光速を c とすると、移相器の遅延時間 $\Delta\tau(V)$ および移相変化量 $\Delta\varphi(V)$ は、

$$\Delta\tau(V) = \frac{l}{c}(\sqrt{\varepsilon_{\parallel}} - \sqrt{\varepsilon_{\perp}}) \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} \Delta\varphi(V) &= 2\pi f \frac{l}{c}(\sqrt{\varepsilon_{\parallel}} - \sqrt{\varepsilon_{\perp}}) \\ &= 2\pi f \Delta\tau(V) \end{aligned} \quad (2.2)$$

となり、印加駆動電圧による遅延時間あるいは位相の制御が可能である。

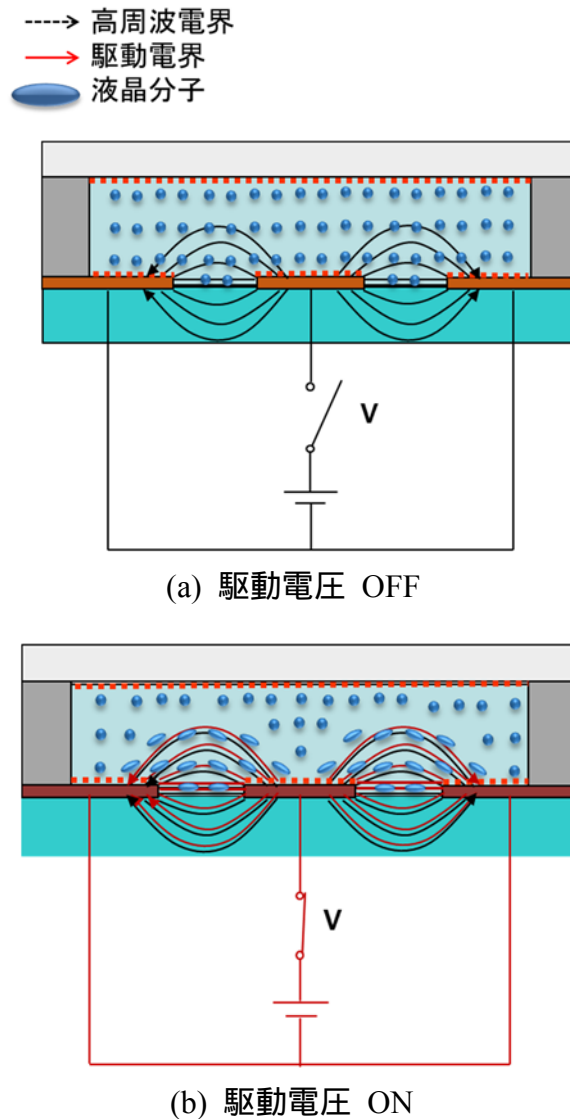


図 2.2 液晶装荷 CPW 型移相器の動作原理

2.2.3 液晶装荷 CPW 型移相器の作製方法

CPW 型移相器は以下のように作製される。まず、高周波誘電体基板(日本ピラー工業, NF260A) の銅箔上にポジ型フォトレジスト(東京応化, OFPR-800) をスピンコート(3500 回転, 5 秒)により塗布する。この際、露光されないように配慮する必要があり、暗室などで行う。次に、オープンでプリバーク(85℃, 30 分)を行った後、図 2.3 に示すように、中心導体線路幅 $w = 300 \mu\text{m}$ 、中心導体線路と接地板とのギャップ $s = 50 \mu\text{m}$ のフォトマスクを銅箔の上に載せ、紫外線露光機(山下電装, HYPERCURE200)で 30 秒間露光を実施し、現像液(東京応,

NMD-W) で 30 秒間現像することによりエッチングする部分のみのレジスト部分を取り除く。再びオープンでポストバーク (130℃, 30 分) を行い、塩化第鉄によりエッチングを実施する。不要な銅箔部分を落とすことで図 2.3 に示すように、中心導体線路幅 $w = 300 \mu\text{m}$ 、ギャップ $s = 50 \mu\text{m}$ の CPW を作製した。線路基板と液晶層と接する基板表面にはポリイミド配向膜 (AL1254, JSR) をスピコート法 (3000 回転, 30 秒) により形成し、アンチパラレル方向となるようにラビング装置 (EHC, RM-50) を用いてラビング処理を施した。その後、上部基板と下部基板の間にスペーサーとして $50 \mu\text{m}$ の PET フィルムを挟み込み、接着し、液晶を注入し、液晶装荷 CPW 型移相器を完成させた。実際に作製したデバイスの写真を図 2.4 に示す。

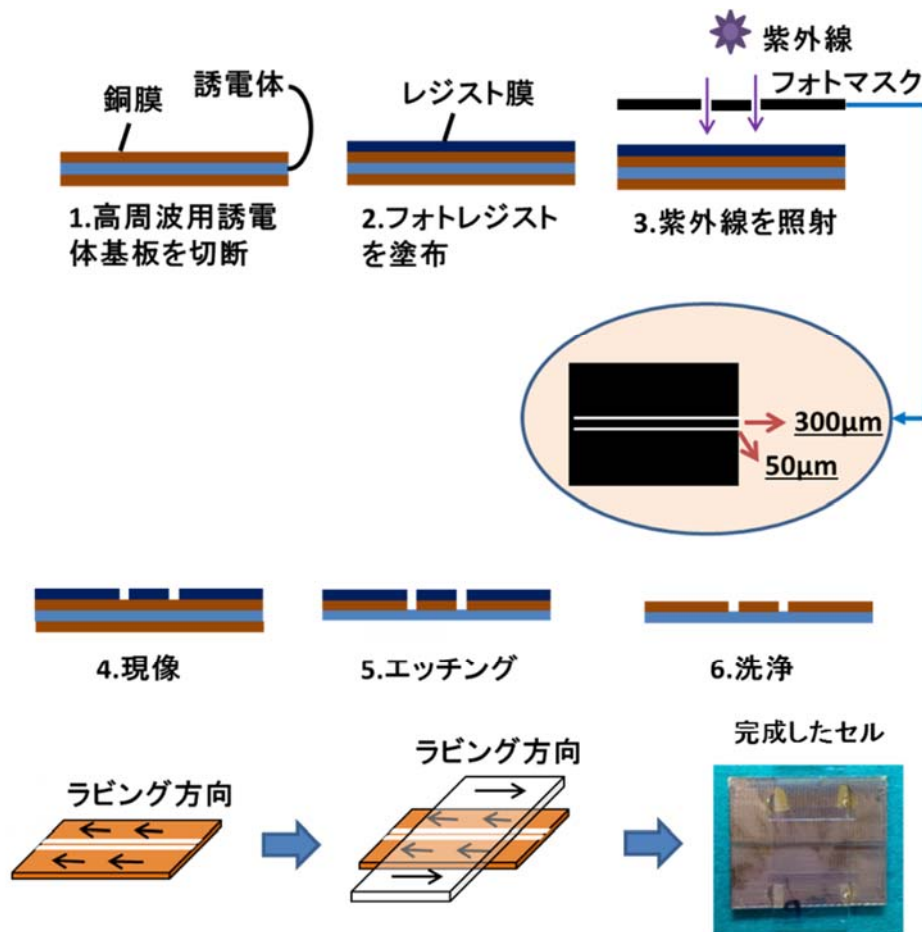


図 2.3 CPW 型移相器基板の作製過程

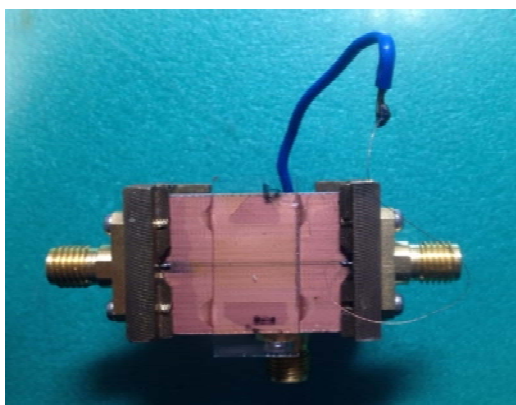


図 2.4 実際に作製した液晶装荷 CPW 型移相器

2.3 液晶装荷 MSL 型移相器の構造・動作原理および作製方法

2.3.1 構造

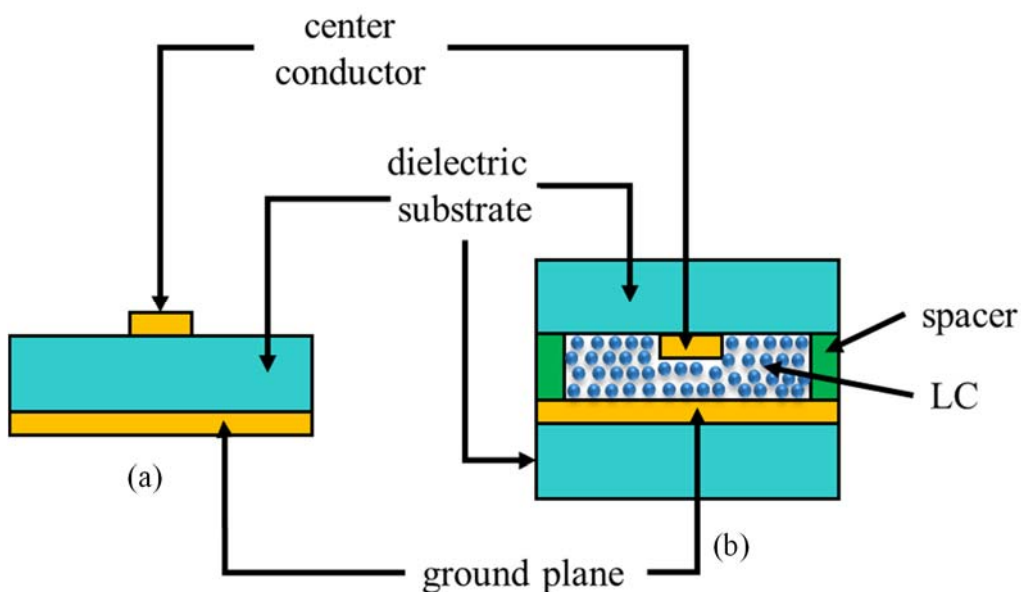


図 2.5 MSL の(a)一般的な MSL、(b)液晶装荷 MSL 型移相器の構造

図 2.5 に一般的な MSL と液晶を用いた MSL 型移相器の構造を示す。一般的な MSL は図 2.5(a)に示すように、接地導体を含めて 2 つの導体が平行にある。また、それらが同一媒質中ではなく空気と誘電体のように 2 種類の媒質間に線路がある場合は、同軸線路のような TEM モードにはならないことが知られている。しかし、回路への組み込みやすさなどから MSL が多く用いられる。中心導体線路と接地面との間に誘電体が挟まれており、この部分にほとんどの誘電体が存在する構造となっている。

一方、液晶を用いた MSL 型移相器では、図 2.5(b) に示すように一般的な MSL 構造における誘電体部分が液晶層に置き換えられる。また、中心導体線路と接地面を保持するための誘電体基板が新たに線路上部基板と接地面下部基板に配置されている点が異なっている。基板表面には CPW 型移相器と同様に配向膜としてポリイミド (JSR ,AL1254)を膜スピンコート法により形成し、アンチパラレルラビング処理を施した。また、液晶装荷 MSL 型移相器構造では通常の MSL と異なり、液晶層を介して対向する基板側に中心導体線路を有するため、低損失、広帯域性幅を維持しながら一般の MSL、CPW や同軸ケーブル等の通常用いる他の高周波伝送線路と直接接続することが困難である。このため、液晶装荷 MSL 型マイクロ波ミリ波移相器の実用化のためには、低挿入損失、広帯域で作動する変換器が必要となり、本研究では、図 2.6 に示すように、MSL-CPW 変換器構造により通常の CPW 型移相器を液晶装荷 MSL 型移相器と接続する方法を用いた。

図 2.6 は CPW-液晶装荷 MSL 変換器を有する液晶装荷 MSL 型マイクロ波ミリ波移相器の構造を示す。本移相器は CPW 部、CPW-MSL 変換部、液晶装荷 MSL 部で構成されている。実際のデバイスでは液晶装荷 MSL 部の両端を CPW 型部に接続するため、2 つの変換部を使用した構造となる。この変換器は高周波誘電体基板により構成されている。図に示すように、下部基板の上面は CPW および CPW の接地導体と同一面上に接続される液晶装荷 MSL 部の接地導体が構成されている。詳細の設計については CPW 型部の中心導体線路幅が $800\ \mu\text{m}$ であり、中心導体線路と接地導体の間の間隙を $100\ \mu\text{m}$ とする。上部基板の下面には MSL の中心導体線路が配置されており、この中心導体線路の幅は $200\ \mu\text{m}$ である。CPW-MSL 変換部では、CPW 型部の中心導体線路と上部誘電体基板の液晶装荷 MSL の中心導体線路は変換部の長さ $1\ \text{mm}$ 全体に渡って、CPW 型部の中心導体線路の上に重なっている。この部分に不整合が発生しないよう、CPW 部の間隙を $100\ \mu\text{m}$ から $200\ \mu\text{m}$ に広げており、特性インピーダンスを $50\ \Omega$ としている。また、上部基板は 4 隅に配置したスペーサ (厚さ $100\ \mu\text{m}$) によって下部基板と平行に固定されている。変換器ははんだにより接合されており、CPW 型部の中心導体線路と MSL の中心導体線路は電氣的に接続されている。これら二つの基板の間に形成された空間に液晶材料を充填する。この液晶層は、通常の MSL の構造での誘電体層としての役割を果たす部分である。なお、本研究に使用した高周波誘電体基板(日本ピラー工業 ,NF260A)の比誘電率は $\epsilon_r=2.6$ である。実際に

作製した CPW-液晶装荷 MSL 変換器を有する液晶装荷 MSL 型マイクロ波ミリ波移相器（以下、液晶装荷 MSL 型移相器）の写真を図 2.7 に示す。

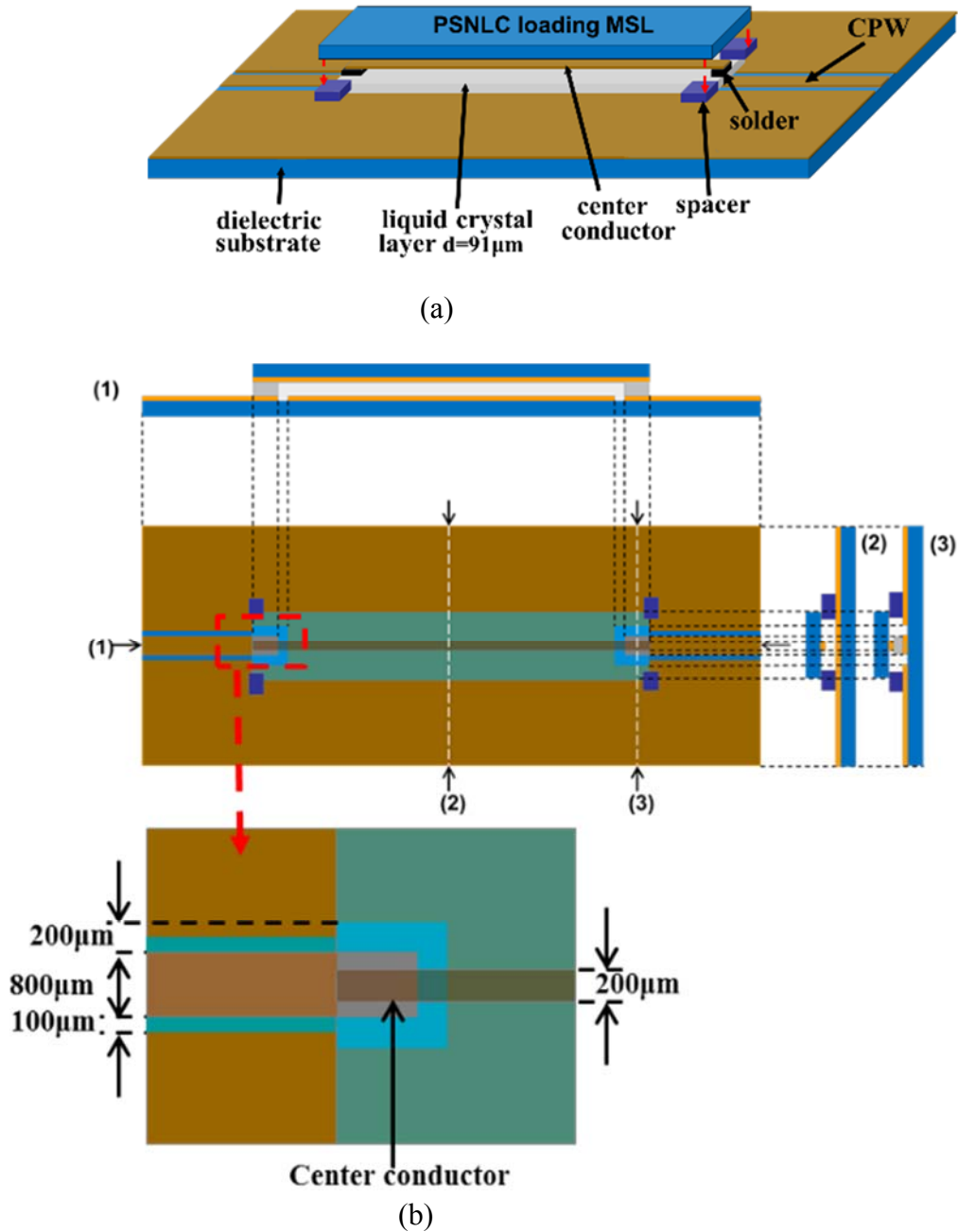


図 2.6 CPW-液晶装荷 MSL 変換器を有する液晶装荷 MSL 型移相器の構造の(a) 概要図、(b)側面および上面図

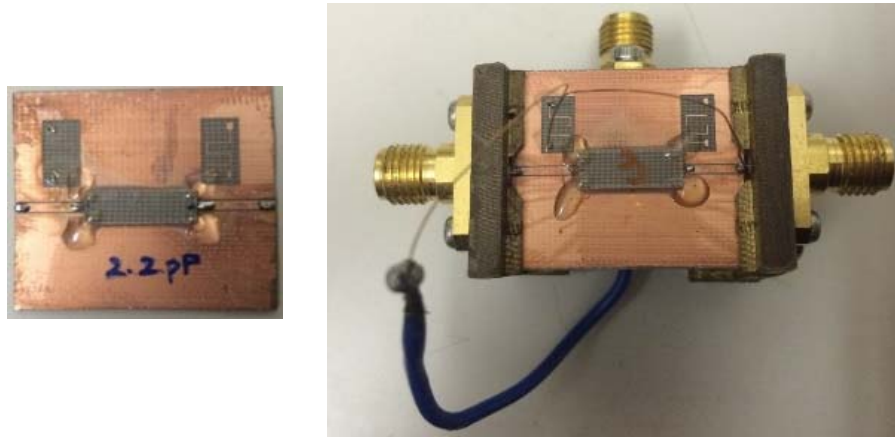


図 2.7 実際に作製した液晶装荷 MSL 型移相器

2.3.2 液晶装荷 MSL 型移相器の動作原理

図 2.8 に液晶装荷 MSL 型移相器の動作原理を示す。図 2.8(a)のように駆動電圧を印加しない場合、液晶層の両境界面に接する基板表面に形成されたポリイミド膜のラビング処理による配向規制力によって、液晶分子は基板に沿って中心導体線路と平行に配向する。このとき、中心導体線路から放射される高周波の電界はすべて接地面に放射されるため、主として高周波電界は液晶分子の短軸方向の誘電率を感じることになる。このときの実効誘電率 $\varepsilon(0)$ は液晶の分子短軸方向の誘電率 ε_{\perp} とほぼ一致する。

一方、図 2.8(b)のように駆動電圧を印加した場合、中心導体線路と接地面の上に駆動電界が生じ、この電界は配向規制力が液晶分子に働くため、液晶分子はこの電界に沿って再配向する。そのため、高周波電界を感じる液晶分子の実効誘電率が変化し、 $\varepsilon(V)$ とすると液晶層の平行誘電率 ε_{\parallel} とほぼ一致する($\varepsilon(V) \approx \varepsilon_{\parallel}$)。ここで、移相器の中心導体線路長を l 、使用周波数を f 、光速を c とすると移相器の遅延時間 $\Delta\tau(V)$ および移相変化量 $\Delta\varphi(V)$ は、それぞれ

$$\Delta\tau(V) = \frac{l}{c}(\sqrt{\varepsilon_{\parallel}} - \sqrt{\varepsilon_{\perp}}) \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \Delta\varphi(V) &= 2\pi f \frac{l}{c}(\sqrt{\varepsilon_{\parallel}} - \sqrt{\varepsilon_{\perp}}) \\ &= 2\pi f \Delta\tau(V) \end{aligned} \quad (2.4)$$

で表され、実効誘電率 $\varepsilon(V)$ を駆動電圧により制御することで遅延時間あるいは位相を制御できることがわかる。

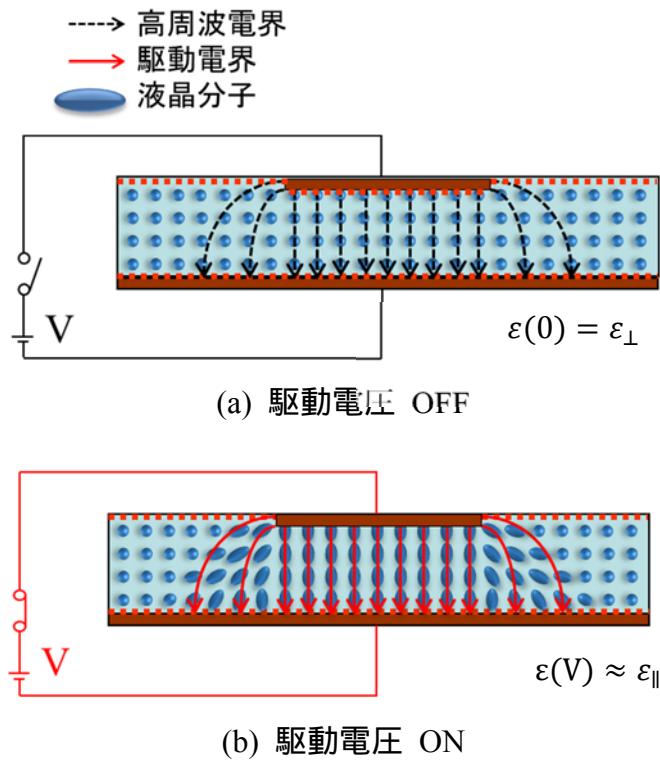


図 2.8 液晶装荷 MSL 型移相器の動作原理

2.4 液晶装荷 CPW 型および MSL 型移相器を用いた液晶デバイスの比較と検討

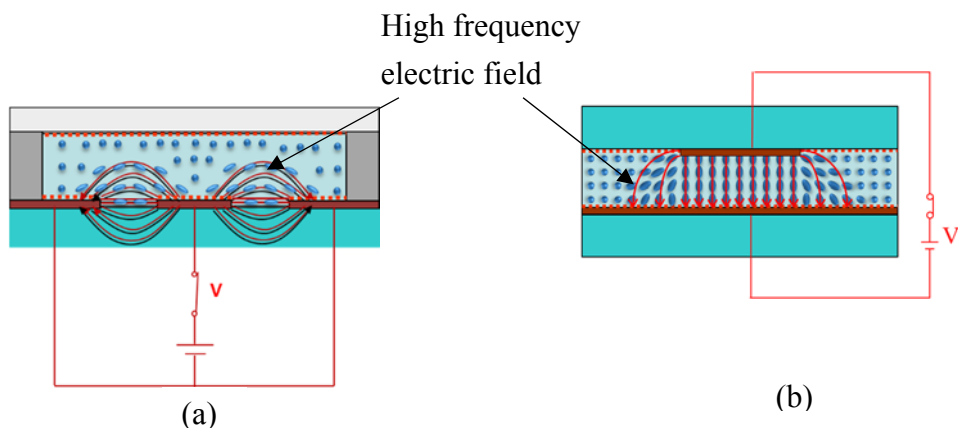


図 2.9 液晶装荷移相器の高周波電界の(a)CPW 型、(b)MSL 型

図 2.9 に液晶装荷 CPW 型および MSL 型移相器の高周波電界の相違点を示す。液晶を用い、マイクロ波ミリ波移相器に CPW 型移相器の構造を採用した場合、図 2.9(a)に示すように、高周波電界は中心導体線路から両側の接地導体面に放射

するため、高周波電界の約半分は液晶部分を伝搬しており、半分以上が下部基板の誘電体部分や空気などの液晶以外の部分を透過するため、液晶層の誘電異方性の変化が小さく、得られる位相変化も小さいことがわかる。一方、MSL 型移相器の構造を採用した場合には、中心導体線路からの高周波電界のほぼすべては液晶層を通り、接地面に放射するため、液晶層の誘電率の変化の大部分を利用することができ、得られる位相変化も大きい。これらのことから、CPW 型移相器に比較して MSL 型移相器を利用した方が約 2 倍大きな位相変化量が得られると考えられる。CPW 型移相器よりも MSL 型移相器の方が効率が良いことがわかる。

CPW 型移相器は、下部基板を誘電体基板にして、上部基板はガラス等で構成されることから、紫外線照射による高分子安定化が可能である。また、装荷した液晶の状況の観察なども容易なため、作製に関しては CPW 型移相器の構造の方が容易であると考えられる。一方、液晶を用いた MSL 型移相器はその構造上、液晶層を挟む両面の基板が誘電体基板で構成されることになり、光学的に不透明となるため、一般的に上部基板から、あるいは下部基板からの紫外線照射による高分子安定化が適用できない。しかし、本研究では液晶装荷 MSL 型移相器の上部基板幅を小さくし、側面から紫外線を照射することで光重合型 PSNLC を利用することを可能としている。

2.5 マイクロ波ミリ波測定系

2.5.1 立ち上がり応答時間および立ち下がり応答時間の定義

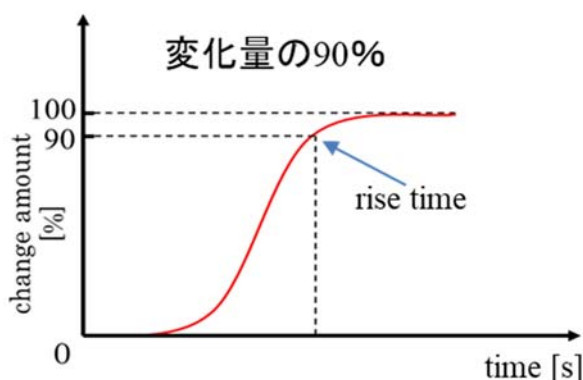


図 2.10 位相変化量と立ち上がり応答時間の定義

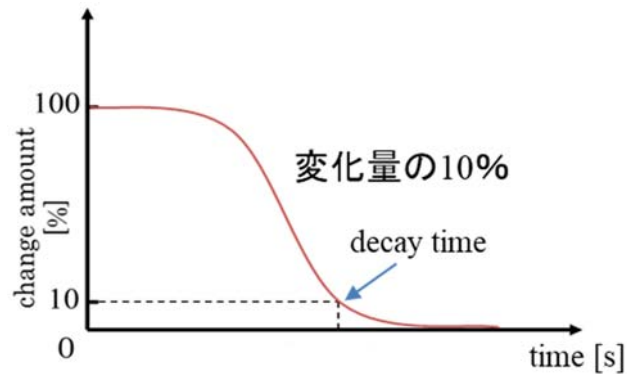


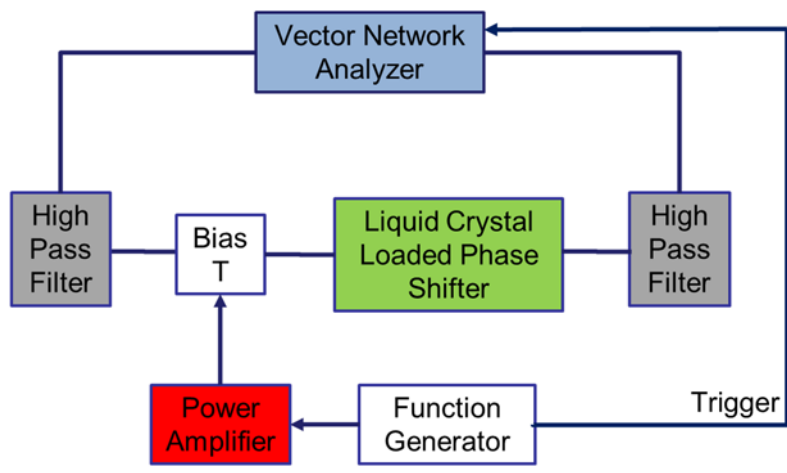
図 2.11 位相変化量と立ち下がり応答時間の定義

測定に際しては、図 2.10 示すように液晶セルに駆動電圧を印加してから位相変化量が飽和値に達する量の 90%まで変化するのに要する時間を立ち上がり時間と定義する。また、図 2.11 に示すように液晶セルから駆動電圧を除去してから位相変化量が初期値の10%までに戻るのに要する時間を立ち下がり応答時間と定義する。

2.5.2 マイクロ波ミリ波測定系

図 2.12 および図 2.13 に、マイクロ波ミリ波領域における液晶装荷 CPW 型移相器および液晶装荷 MSL 型移相器の時間応答特性および位相特性の測定系を示す。ベクトルネットワークアナライザ (Vector Network Analyzer : VNA) では、被測定デバイスと 2 つのハイパスフィルター (High Pass Filter : HPF) との間の端面で校正を行った後、被測定デバイスの 20 GHz の測定周波数における伝送特性 S_{21} の位相を観測する。

図 2.12 に示したファンクションジェネレーター (Tektronix , AC 1200) から駆動電圧として 0 V ~ 3.5 V、5 kHz の矩形波電圧を出力する。この矩形波電圧をパワーアンプ (NF , HSA4051) に入力し、ここで 40 倍に増幅された後にバイアス T に印加され、液晶装荷マイクロ波ミリ波移相器に印加する。なお、HPF は、この印加駆動電圧が VNA に流れ込まないように機材保護の役割を果たしている。印加駆動電圧を液晶装荷マイクロ波ミリ波移相器に印加すると同時にトリガーが VNA に入力される。その瞬間から被測定デバイスの伝送特性 S_{21} の位相量が変わる様子を VNA のオシロスコープで波形を観測することができ、被測定デバイスを伝送する 20 GHz の周波数における応答時間特性および位相特性が測定できる。



Function Generator : Tektronix AC 1200
Power Amplifier : NF, HSA 4501
Vector Network Analyzer : Agilent, N5230A
 (frequency : 20 GHz)
High Pass Filter : 10 GHz of cutoff frequency

図 2. 12 マイクロ波ミリ波測定系

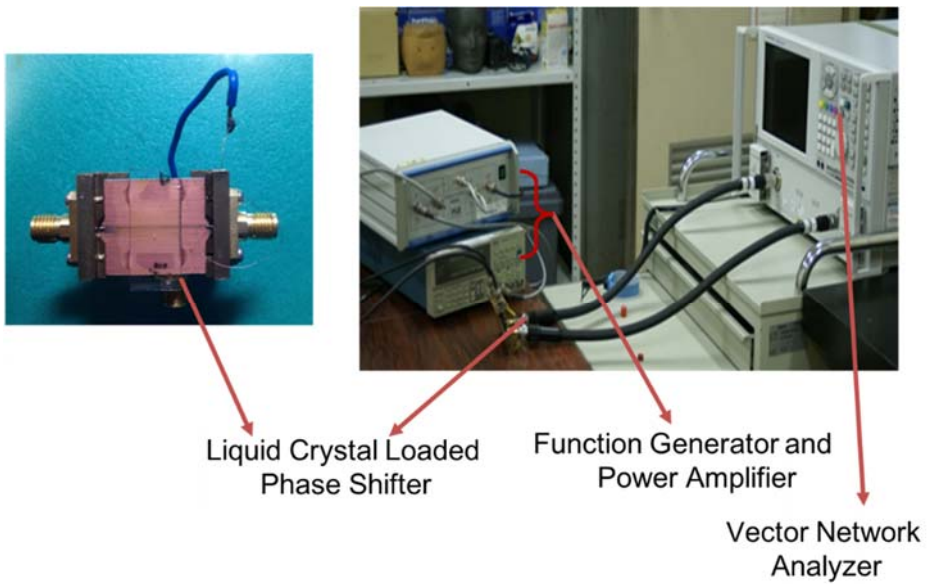


図 2. 13 マイクロ波ミリ波測定系

2.6 液晶装荷 CPW 型および MSL 型移相器の動作確認

当初、BL006 (Merck) ネマティック液晶単体 (0 wt%) を用い、CPW 型および MSL 型移相器に装荷し、応答特性および位相変化の駆動電圧依存性を測定した。本研究では、マイクロ波ミリ波移相器の特性を測定時に 20 GHz の周波数帯で実施した。

液晶単体装荷 CPW 型移相器の測定結果に関して、立ち上がり応答時間を図 2. 14(a)に示す。液晶単体では特に印加駆動電界が低い場合において、立ち上がり応答時間が数百 ms となり、最大値は約 280 ms であった。これは、液晶層の電界が強い中心導体線路と接地面間のギャップ部分の液晶分子は応答が完了した状態であっても、それ以外の電界が微弱である部分の液晶分子がわずかながら応答を続けており、結果的に全体としての立ち上がり応答時間が長くなったものだと考えられる。電界が高くなると立ち上がり応答時間が短くなり、1.25 V/ μm の電界において約 50 ms である。この結果より立ち上がり応答時間は駆動電界に依存することがわかる。また、理論において立ち上がり応答時間は次の式により求められる。

$$\tau_r = \frac{\eta}{\varepsilon_0 |\Delta\varepsilon| (E_0^2 - E_c^2)} \quad (2.5)$$

ただし、 η は粘性係数、 E_0 および E_c はそれぞれ駆動電界および閾値電界、 $\Delta\varepsilon$ ($\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp}$) は誘電異方性である。BL006 ネマティック液晶の閾値電圧は 1.1 V であり、液晶装荷 CPW 型移相器のギャップの幅は 50 μm であるため、閾値電界は 0.022 V/ μm となる、すなわち $E_c = 0.022$ V/ μm となる。ここで、 $1/(E_0^2 - E_c^2)$ の値を横軸にし、実験で実際に求められた立ち上がり応答時間を縦軸とすると立ち上がり応答時間と $1/(E_0^2 - E_c^2)$ の関係が図 2. 14(b) のようになる。この図により、立ち上がり応答時間は $1/(E_0^2 - E_c^2)$ と比例する、すなわち $(E_0^2 - E_c^2)$ と反比例することを確認できた。したがって、得られた液晶単体装荷 CPW 型移相器の立ち上がり応答時間はほぼ理論に基づいた結果であると言える。立ち上がり応答時間は $1/(E_0^2 - E_c^2)$ の値と同時平行に減少し、 $1/(E_0^2 - E_c^2)$ が 0 に接近すれば立ち上がり応答時間も 0 s に近づくことがわかる。一つの液晶材料において閾値電圧は一定であるため、これより液晶素子に印加される駆動電界を制御することで立ち上がり応答時間を簡単に制御することができると考えられる。

立ち下がり応答時間および位相変化をそれぞれ図 2. 14(c)および図 2. 14(d)に示す。一般的に、立ち下がり応答時間 τ_d は式：

$$\tau_d = \frac{\eta d^2}{\pi^2 k} \quad (2.6)$$

で計算される。ただし、 η は粘性係数、 d は液晶層厚、 k は弾性定数である。図 2. 14(c)に示すように、実際に測定した立ち下がり応答時間には式 (2.6)の通りに印加駆動電界にほとんど依存せず、1.25 V/ μm の駆動電界において約 14 s となり、非常に長いことがわかった。一方、位相変化に関しては図 2. 14(d)に示すように、1.25 V/ μm の印加駆動電界のときでは、最大値 0.06 deg/GHz \cdot mm の位相変化が得られた。

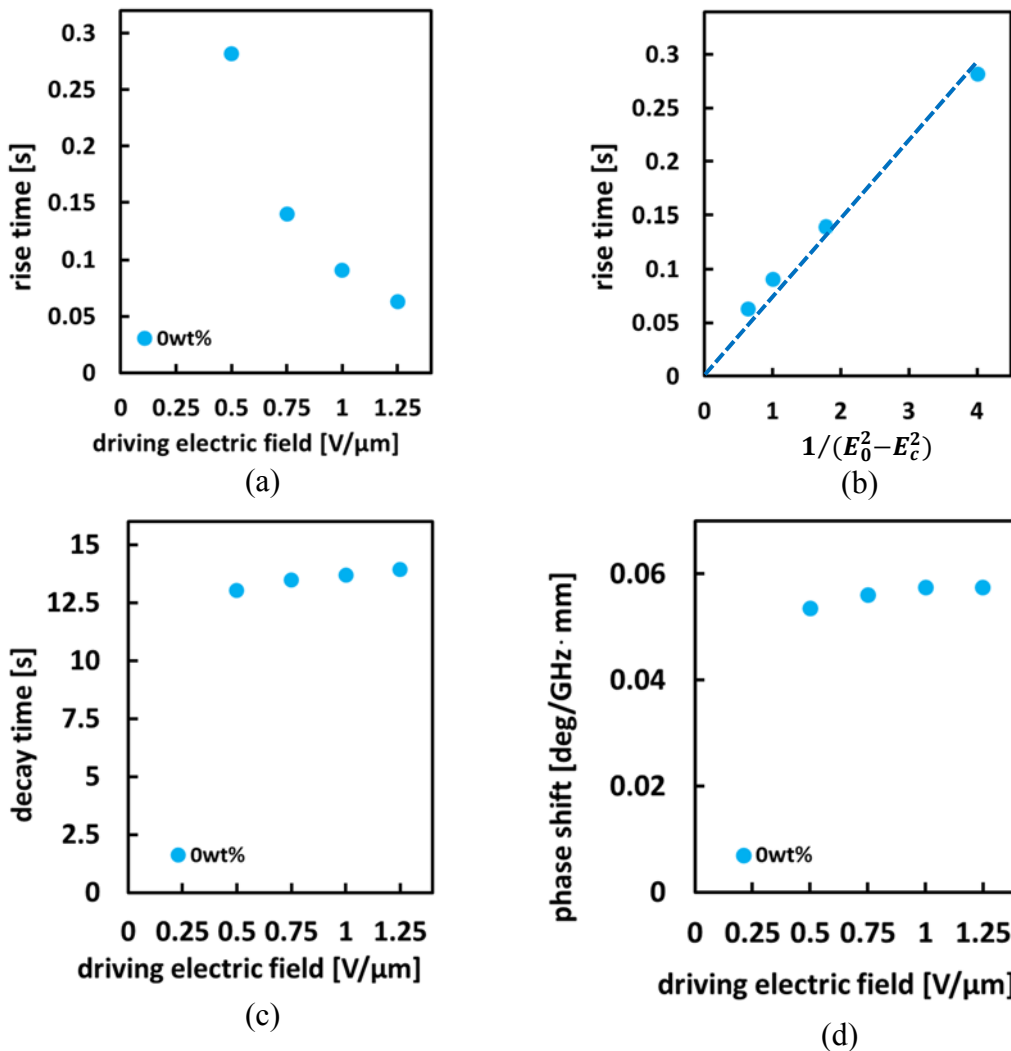


図 2. 14 液晶単体装荷 CPW 型移相器の測定結果の

- (a) 立ち上がり応答時間、(b) 立ち上がり応答時間と $1/(E_0^2 - E_c^2)$ の関係、
(c) 立ち下がり応答時間、(d) 位相変化

液晶単体装荷 MSL 型移相器の応答特性測定においても CPW 型移相器の場合と同様に、測定周波数は 20 GHz とした。立ち上がり応答時間の測定結果および立ち上がり応答時間と $1/(E_0^2 - E_c^2)$ との関係を示す図 2. 15(a) および図 2. 15(b) に示す。図 2. 15(a) より、立ち上がり応答時間は駆動電界に依存し、 $0.5 \text{ V}/\mu\text{m}$ の駆動電界では約 205 ms であり、 $1.25 \text{ V}/\mu\text{m}$ の駆動電界のときに 48 ms となり、電界の増加により減少することが確認できた。また、図 2. 15(b) に示すように、液晶単体装荷 CPW 型移相器と同様に、液晶単体装荷 MSL 型移相器においても実験で得られた立ち上がり応答時間はほぼ理論に基づいた結果であると言え、移相器に印加される駆動電界を制御することで立ち上がり応答時間を簡単に制御することができると思われる。

立ち下がり応答時間および位相変化を示す図 2. 15(c) および図 2. 15(d) に示す。立ち下がり応答時間に関しては、図 2. 15(c) に示すように、印加駆動電界に依存せず、ほぼ一定値であり、約 48 s であることがわかった。また、この測定結果を液晶単体装荷 CPW 型移相器の立ち下がり応答時間が 14 s であることと比べ、液晶単体装荷 MSL 型移相器の立ち下がり応答時間の方が約 3.4 倍長いことがわかる。これは CPW 型移相器において、液晶層厚は $50 \mu\text{m}$ であることに對して MSL 型移相器の液晶層厚は約 $91 \mu\text{m}$ であり、約 1.82 倍厚いからである。式 (2. 6) にしたがって、液晶層厚が 1.82 倍厚いと立ち下がり応答時間は 3.3 倍長くなるということが分かるように、液晶単体装荷 CPW 型移相器と液晶単体装荷 MSL 型移相器における立ち下がり応答時間は、ほぼ理論に基づいた変化をしていると言える。位相変化については、図 2. 15(d) に示すように、印加駆動電界が $1.25 \text{ V}/\mu\text{m}$ のとき最大値 $0.133 \text{ deg}/\text{GHz}\cdot\text{mm}$ の結果が得られ、液晶単体装荷 CPW 型移相器の最大位相変化である $0.06 \text{ deg}/\text{GHz}\cdot\text{mm}$ と比較すると、液晶単体装荷 MSL 型移相器の位相変化が約 2 倍大きいことがわかった。これは 2.4 節でも説明したように、液晶装荷 MSL 型移相器の構造では、中心導体線路からの高周波電界のほぼすべては液晶層を通り、接地面に放射するため、液晶層の誘電率の変化の大部分を利用することができ、CPW 型移相器と比べ得られる位相変化が大きいである。

以上の測定結果により、液晶単体装荷 CPW 型移相器および MSL 型移相器の動作を確認できた。また、応答特性において、立ち上がり応答時間は両方とも 0.5 s 以下であったが、立ち下がり応答時間は数十秒であり、非常に長いことがわか

った。液晶単体装荷 MSL 型移相器の立ち下がり応答時間の方が液晶単体装荷 CPW 型移相器より長い、これは MSL 型移相器の方が液晶層が厚いからである。実際のデバイスに適用するにはこれらの立ち下がり応答時間を改善する必要があると考えられる。さらに、位相変化において液晶単体装荷 CPW 型移相器より、液晶単体装荷 MSL 型移相器の方が約 2 倍大きい、MSL 型移相器の方が効率が良いことを確認できた。

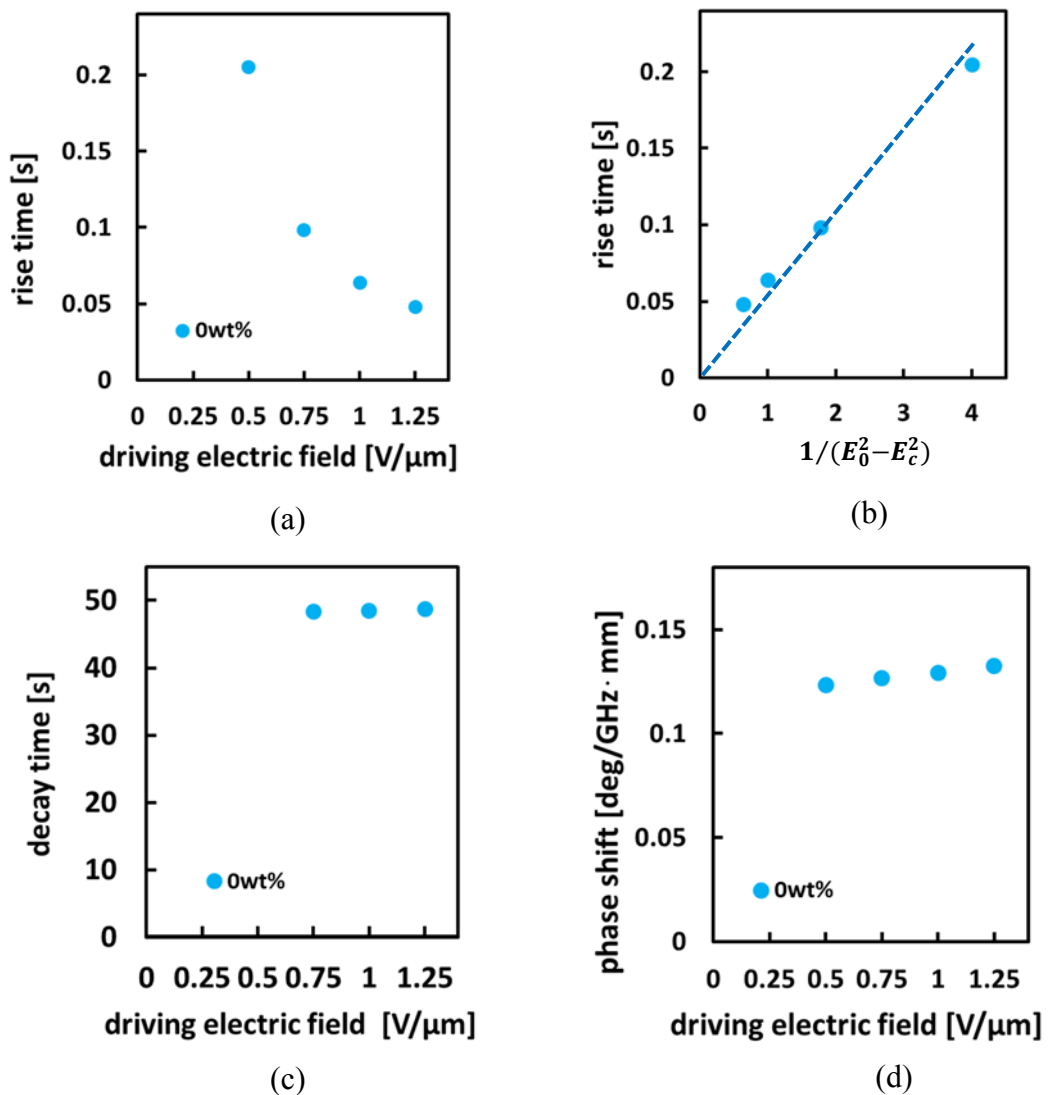


図 2.15 液晶単体装荷 MSL 型移相器の測定結果の
 (a) 立ち上がり応答時間、(b) 立ち上がり応答時間と $1/(E_0^2 - E_c^2)$ の関係、
 (c) 立ち下がり応答時間、(d) 位相変化量

2.7 まとめ

本章では、液晶装荷 CPW 型および MSL 型移相器の構造と基礎的な CPW 型および MSL 型伝送線路の相違点を述べた。次に、位相変化原理を中心としてそれぞれの移相器の動作原理について述べ、これらの特徴から液晶装荷マイクロ波ミリ波移相器として使用した場合の作製要領や特性への影響等を検討した。液晶装荷 MSL 型移相器を実用化するために CPW-液晶装荷 MSL 変換器を有する液晶装荷 MSL 型移相器の構造の使用を検討した。さらに、駆動電圧が印加時の液晶装荷 CPW 型移相器および液晶装荷 MSL 型移相器の高周波電界の比較を行うとともに、本研究で用いるマイクロ波ミリ波測定系を説明した。液晶装荷 MSL 型移相器の構造の場合では、中心導体線路からの高周波電界のほぼすべては液晶層を通り、接地面に放射するため、液晶層の誘電率の変化の大部分を利用することができ、得られる位相変化も大きいであるため、CPW 型移相器に比較して MSL 型移相器の方が効率が良いことがわかった。最後に、実際に作製した液晶単体装荷 CPW 型および MSL 型移相器の動作を確認し、それらの応答特性を検討した。液晶装荷 CPW 型および MSL 型移相器の動作を確認できた。また、測定結果により、液晶単体を用いる場合では立ち下がり応答時間は数十秒であり、非常に長いことがわかった。実際のデバイスに応用するには、これらの立ち下がり応答時間を改善する必要があると考えられる。さらに、位相変化において液晶単体装荷 CPW 型移相器より、液晶単体装荷 MSL 型移相器の方が約 2 倍大きい、MSL 型移相器の方が効率が良いことを実験により確認できた。

第 3 章

光重合型高分子安定化ネマティック液晶による CPW 型および MSL 型移相器の応答改善

3.1 はじめに

第 2 章での測定結果より、液晶単体装荷 CPW 型移相器および MSL 型移相器の応答特性において、立ち上がり応答時間は両者とも 0.5 s 以下であったが、立ち下がり応答時間は数十秒であり、非常に長いことが確認できた。これは、移相器の液晶層が通常のディスプレイ等の液晶層と比べ非常に厚いからである。デバイスとして応用するには、この電圧を除去した際の立ち下がり応答時間を改善する必要がある。本章では、液晶装荷 CPW 型および MSL 型マイクロ波ミリ波移相器の立ち下がり応答時間の改善方法として、光重合型高分子安定化ネマティック液晶 (Polymer Stabilized Nematic Liquid Crystal : PSNLC) を取り上げ、立ち下がり応答時間の改善の検討を行う[73, 74, 79-85]。まず、高分子安定化ネマティック液晶の基礎について、立ち下がり応答時間の改善の原理を説明するとともに、その調製方法や調製過程等について述べる。次に、テストセルとして ITO ガラス平行平板セルの作製過程、液晶分子の初期配向方向を寄与するラビング過程のラビング方向の違いについて説明する。また、作製した ITO ガラス平行平板液晶セルを用い光重合型 PSNLC の重合性モノマー濃度による複素誘電率の駆動電圧依存性および過渡応答特性への影響等について実験で検討した結果について説明する。さらに、ITO ガラスを用いた平行平板液晶セルにおける光重合型 PSNLC の測定結果から、前章で検討した液晶単体装荷 CPW 型と MSL 型マイクロ波ミリ波移相器に、液晶単体の代わりに光重合型 PSNLC を導入した際の応答特性について検討する。最後に、MSL 型移相器における高分子ネットワーク形成の場所依存性を確認するため、3 本線平行平板液晶セルを使用し検討を行った結果を述べる。

3.2 ITO ガラス平行平板セルの作製

3.2.1 ITO ガラス平行平板セルの作製過程

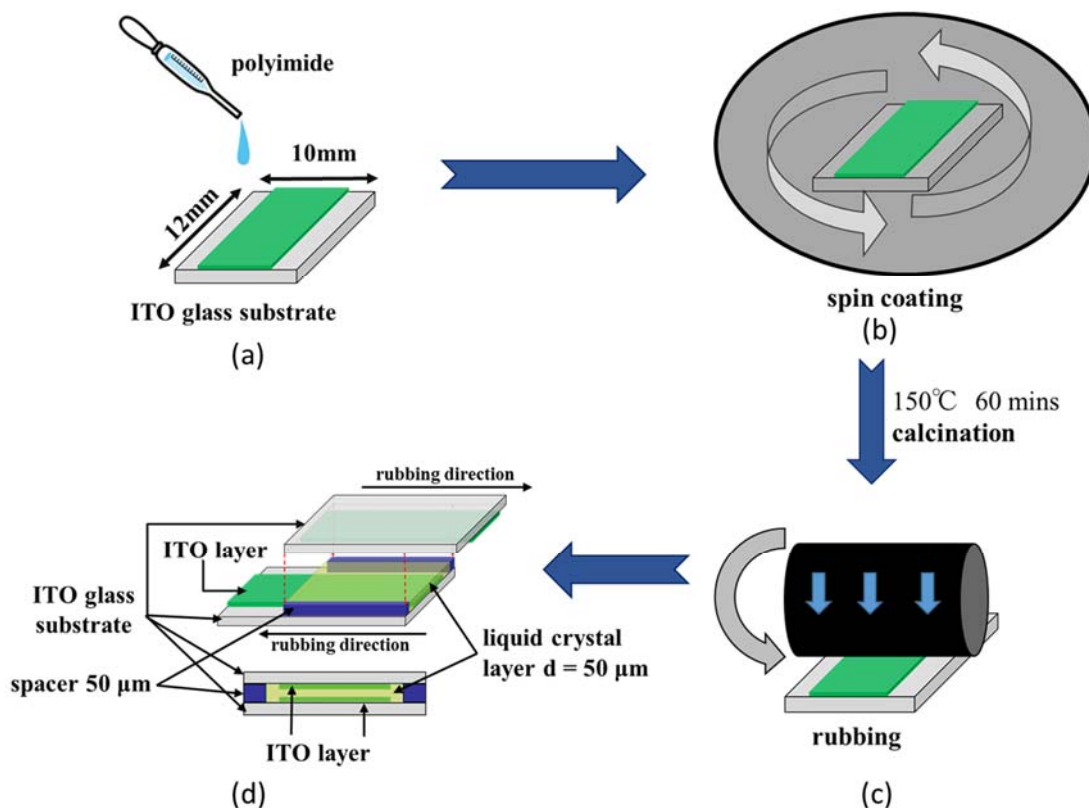


図 3.1 ITO ガラス平行平板セルの作製手順

実験には高屈折率異方性を有するネマティック液晶 (Merck, BL006) を液晶材料として使用した。図 3.1(a) に示すように横 10 mm、縦 12 mm 程度の ITO ガラス基板を切断して準備しておく。ガラス基板の電極がある面に幅 5 mm のビニルテープを隙間なく貼り着け、塩酸溶液に約 10 分入れて ITO をエッチングする。塩酸溶液から取り出し、洗浄した後に乾燥させ、テープの部分を剥がした。このとき、電極 ITO はテープの下の部分、すなわち、ガラスの中央のみに所望の電極が残る。その後、エッチングしたガラス基板をアセトンおよびエタノールで 15 分間超音波洗浄し、セルの基板とした。次に、液晶セルの作製手順の図 3.1(a) および図 3.1(b) に示すように、まず、ガラス基板の表面に配向用ポリイミド (JSR, AL1254) を 1000 rpm で 5 秒間、3000 rpm で 30 秒間スピコート (共和理研, K-359S1) で塗布した。塗布した後、オープン (ヤマト科学, DN4101) に入れ、1 時間 150℃ で加熱し、溶媒を飛ばしてポリイミド膜を成膜した。次に図 3.1(c) に示

すようにラビング装置 (EHC, RM-50) を用いてアンチパラレルラビング処理を行う。このラビング処理によって、ネマティック液晶分子がガラス面に対して平行となる。

配向処理を行った ITO ガラスのそれぞれ ITO 部分を重ねて、所望の厚さの PET フィルムを挟み込み、光硬化剤 (E.H.C, LCB-610) を用いて紫外線露光装置で約 10 分間紫外線を照射することによりガラス基板を固定し、図 3. 1(d) に示すセル本体を作製した。その後、両端の ITO 部に超音波はんだごてを用いて銅線をはんだ付けし、セルを完成させた。作製完成したセルを図 3. 2 に示す。

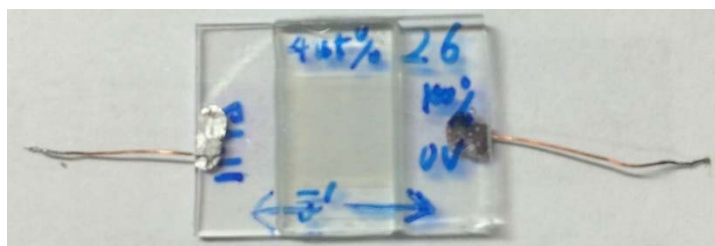


図 3. 2 実際作製完成した ITO ガラス平行平板セル

3.2.2 セル厚の測定方法

(a) 光学測定方法

セル厚は、液晶を注入する前の空セルの透過スペクトルから求めた。透過スペクトルの測定方法は図 3. 3 に示すように、顕微鏡 (Nikon, Optiphot2-po1) と分光器 (浜松ホトニクス, PMA11) を用いて測定した。まず、サンプルのセルがない状態のスペクトルをリファレンスとして測定する。次に、液晶セルのスペクトルを測定し、リファレンスのスペクトルで割ることで透過スペクトルが得られる。

空セルの透過スペクトルを測定すると、セルギャップに対応した干渉が現れる。ここで、隣り合う干渉ピークの波長を λ_1 、 λ_2 とするとセル厚 d は

$$d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_2 - \lambda_1)} \quad (3.1)$$

で与えられる。つまり、透過スペクトルからピーク波長 λ_1 、 λ_2 を求め、式 (3.1) に代入することで、セル厚 d が求まる。

一方、転送行列法を用いると、任意の構造の透過率を求めることができる。転送行列法とは、マクスウェル方程式を行列形式に記述したものである。転送行列法によって求められたガラス/空気/ガラスの透過率は

$$T = \frac{16n^2}{(n+1)^4} \left[1 + \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^4 - 2 \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \cos \left(2 \frac{\omega d}{c} \right) \right] \quad (3.2)$$

で与えられる。ここで、 ω は角周波数、 c は光速、 n は屈折率である。

転送行列法を用いたセル厚測定では、転送行列法によって計算した透過スペクトルと実験で得られた透過スペクトルを比較し、フィッティングすることでセル厚 d が求まる。

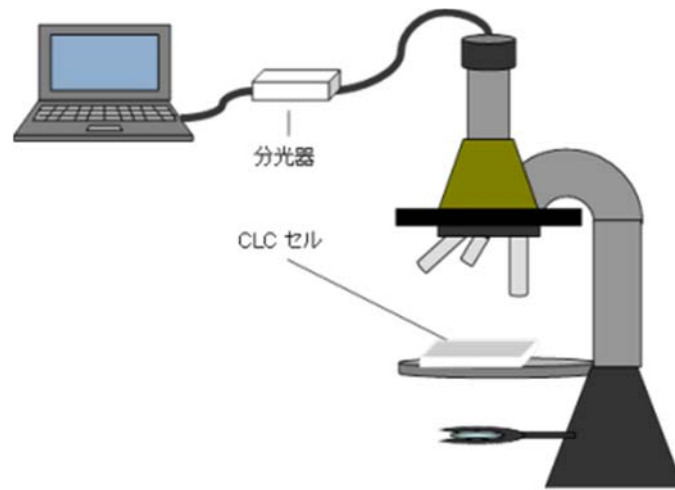


図 3.3 顕微鏡によるセル厚の測定系

(b) 誘電測定方法

作製した ITO ガラスセルを図 3.4 に示す。このとき、セルをコンデンサと見なし、求めるのは上部基板と下部基板の間隔 d である。また、セル中の空気の比誘電率 ϵ_r は 1 であり、真空の誘電率 ϵ_0 は 8.854×10^{-12} F/m である。

まず、上部基板と下部基板の重なっている ITO 部分の面積 S (赤色断線に囲まれた部分) をデジタル顕微鏡(デジタルマイクロスコプ)を用いて測定する。次に、図 3.5 のように、インピーダンスアナライザ (Agilent, 4192A) を用いて静電容量 C を測定する。

一般に、平行平板コンデンサの容量 C は

$$C = \frac{\epsilon_r \times \epsilon_0 \times S}{d} \quad (3.3)$$

で与えられる。上に述べたように空気の比誘電率 ϵ_r は1であるため、セルの厚さ d は

$$d = \frac{\epsilon_0 \times S}{C} \quad (3.4)$$

となり、測定した面積 S および容量 C を代入することにより、セルの厚さ d を計算した。

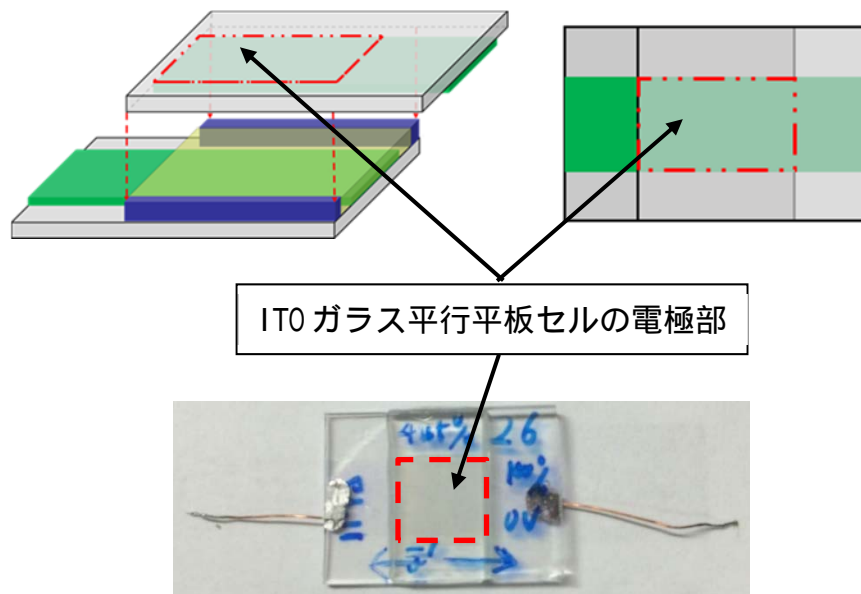


図 3.4 ITO ガラス平行平板セルの電極部

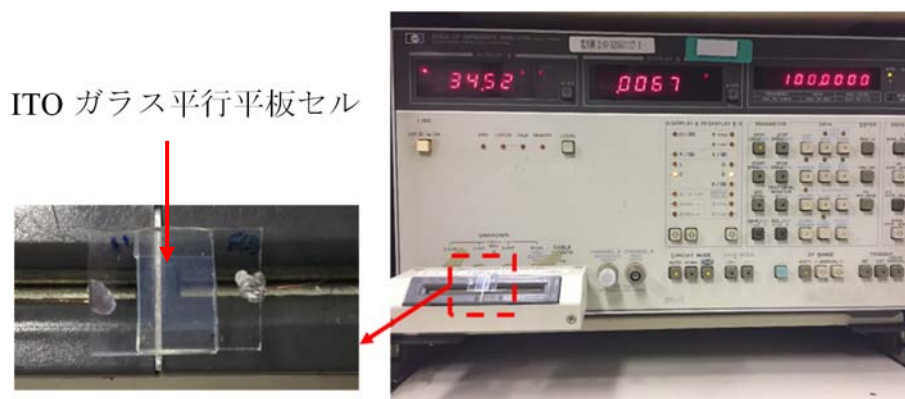


図 3.5 空セルの静電容量の測定

3.3 PSNLC の基礎

図 3. 6(a)に示すように、ネマティック液晶を液晶材料として少量の重合性モノマーを添加し、液晶相において紫外線照射することにより液晶中に高分子ネットワークが形成し、これを光重合型高分子安定化ネマティック液晶と呼ぶ。一般的に高分子を用いた液晶の応答改善には高分子分散液晶 (Polymer Dispersed Liquid Crystal: PDLC) が知られているが、PDLC は PSNLC と比べて高分子の割合が高く、図 3. 6(b)に示すように高分子中に液晶ドロップレットが形成された構造をしている [86] 。PDLC は電圧を印加しない状態で高分子と液晶の屈折率を合わせて透明状態を実現し、電圧を印加したときに液晶の屈折率が高分子の屈折率と差を生じさせることにより散乱状態を実現して散乱型の表示素子として使用される。マイクロ波応用を考えた場合に PDLC は高分子の占める割合が高く、PSNLC と比較して電界に対して応答しない高分子の割合が大きくなるため誘電異方性が小さくなるという欠点がある。

液晶の立ち上り応答時間(τ_r) および立ち下がり応答時間(τ_d)は次のように表される。

$$\tau_r = \frac{\eta}{\varepsilon_0 |\Delta\varepsilon| (E_0^2 - E_c^2)} \quad (3.5)$$

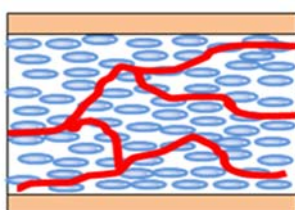
$$\tau_d = \frac{\eta d^2}{\pi^2 k} \quad (3.6)$$

ただし、 η は粘性係数、 E_0 および E_c はそれぞれ駆動電界および閾値電界、 $\Delta\varepsilon$ ($\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp}$) は誘電異方性、 d は液晶層厚、 k は弾性定数である。ここで、立ち上がり応答時間は液晶に駆動電界を印加した際に液晶分子が電界に沿って再配向するのに要する時間である。また立ち下がり応答時間は駆動電界を除去した際に、液晶分子が初期配向方向に戻るのに必要な時間である。式(3.5)から、立ち上がり応答時間は駆動電界に依存することが分かる。一方、式(3.6)から、立ち下がり応答時間は液晶層厚の 2 乗に比例して長くなることが分かる。したがって、ある素子の立ち下がり応答時間は液晶材料の材料定数が決まれば、その素子の液晶層の厚さによって決まるといえる。

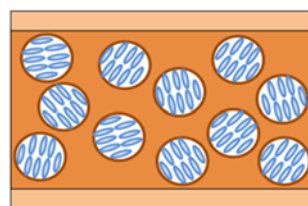
ディスプレイ等の表示素子の分野に用いられる液晶に関しては、その液晶層厚は10 μm 以下と薄いものがほとんどであり、立ち下がり応答時間も比較的に短くなる。一方、マイクロ波移相器等のマイクロ波デバイスに用いられる液晶の層

厚に関しては、挿入損失を考慮したものになるため、通常 50 μm から数百 μm であるため、立ち下がり応答時間は非常に長くなり、数秒から数十秒といったものになる。

PSNLC の場合、高分子ネットワークが配向規制力を持つため、基板と同様に界面の役割を果たす。そのため、液晶分子はデバイスの基板以外にも、層内に形成された高分子ネットワーク界面からの配向制御を受ける [87, 88]。すなわち、式 (3.6) に示した立ち下がり応答時間中の d は、実際の液晶層厚ではなく、高分子ネットワーク間の距離となるため、擬似的に液晶層厚を薄くしたのと同様の効果が得られ、立ち下がり応答時間を改善することが期待できる。しかし、PDLC と同様に液晶層の数が増えた分に応じて閾値電圧が高くなり、界面が増えることにより界面近傍のほぼ動かない液晶分子が多くなるため誘電異方性は低下する。ただし、PDLC と比較して添加する高分子量が少ないため誘電異方性の減少は PSNLC の方が PDLC と比べて小さくなるという特徴がある。



(a) 光重合型 PSNLC



(b) 高分子分散型液晶 (PDLC)

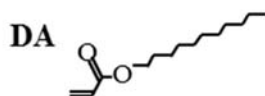
図 3.6 光重合型 PSNLC および高分子分散型 (PDLC)

3.4 光重合型 PSNLC の調製

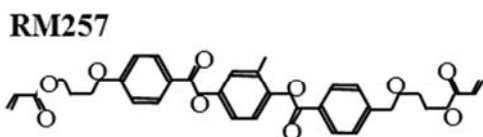
液晶材料には、マイクロ波ミリ波移相器に適した高屈折率異方性を有するネマティック液晶 BL006 (Merck) を使用した。図 3.7 に、このネマティック液晶の相系列、各モノマーおよび重合開始剤の分子構造を示す。液晶中に高分子ネットワークを形成させるための重合性モノマーとして、一官能性の Dodecyl Acrylate (DA) および二官能性の RM257 (Merck) を使用した。また、光重合開始剤として 2,2-dimethoxy-2-phenylacetophenone (DMPAP) を使用した [80, 81]。PSNLC の調製過程は、まず、液晶材料 BL006 と重合性モノマーの DA および RM257 をそれぞれ所定の分量をサンプル瓶に投入し、加熱装置付マグネティックスターラー (ASONE, RSH-4DN) で約 70 $^{\circ}\text{C}$ に保持しながら 30 分間攪拌する。

これは室温では固体である二官能性モノマーRM257 を溶解するための処置である。室温に戻した後、サンプル瓶に遮光措置を施し、光重合開始剤 DMPAP を必要な分量を投入する。その後、約 40°C に保持しながら 30 分間攪拌したものを液晶セルに封入し、紫外線照射による光重合により PSNLC を作製し、使用した。

重合性モノマー



✓ DA : dodecyl acrylate <一官能性>



✓ RM257 (Merck) <二官能性 >

液晶

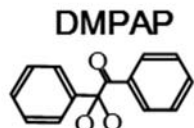
BL006(Merck)

Cryst. - N - Iso.
<-20°C 113°C

$\Delta\varepsilon=17.3$, $\varepsilon_{//}=22.8$
(1kHz, 20°C)

$\Delta n=0.286$, $n_0=1.53$
(589nm, 20°C)

光重合開始剤



✓ DMPAP : 2,2-dimethoxy-2-phenylacetophenone

図 3.7 ネマティック液晶 BL006 の相系列および各モノマー、重合開始剤の分子構造

3.5 複素誘電率の駆動電圧依存性測定

3.5.1 測定系と測定原理

図 3.8 に平行平板液晶セルの複素誘電率の駆動電圧依存性の測定系を示す。ファンクションジェネレータ (Agilent, 33250A) から出力した誘電率測定用の周波数 100 kHz の高周波電圧 V_h を分枝し、一方を直接 RF ロックインアンプ (SRS, SR844) のリファレンス入力に印加し、もう一方はパワーアンプ (NF, HSA4051) で増幅し、液晶セル (LC cell) と抵抗に印加した。このとき、抵抗の両端の電圧を RF ロックインアンプ (SRS, SR844) の信号入力に印加することにより、液晶セルを流れる電流を測定した。

一方、もう一台のファンクションジェネレータ (NF, WF1948) から出力した液晶駆動用の低周波電圧 V_0 (1kHz の変調波) をパワーアンプ (NF, HSA4051) で増幅し、平行平板液晶セルに印加した。液晶セルのインピーダンス Z_{LC} は抵抗 R よりも非常に大きいため、この駆動電圧は液晶セルに全てを印加されると見なすことができる。この電圧により、液晶の配向方向を制御する。液晶配向方向が変化することによって、液晶の誘電率が変化し、平行平板セルの容量 C が変化する。このため、抵抗に流れる電流も変わっていく。抵抗の両端の電圧の高周波成分の振幅 V_m と位相 θ が RF ロックインアンプ (SRS, SR844) で検出され、その波形をデジタルオシロスコープで観察することにより、時間応答の測定を行った。

高周波信号の電圧を V_h 、その周波数を f 、抵抗を R として液晶セルのアドミタンス Y_{LC} を表すと、

$$Y_{LC} = G + jB = \frac{V_m}{RV_h} \cos\theta + j \frac{V_m}{RV_h} \sin\theta \quad (3.7)$$

と表すことができる。ここで G はコンダクタンスであり、 B はサセプタンスである。式 3.7 の実部と虚部をそれぞれ分けて考えると、

$$\left\{ \begin{array}{l} G = \frac{V_m}{RV_h} \cos\theta \end{array} \right. \quad (3.8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} B = \omega C = \frac{V_m}{RV_h} \sin\theta \end{array} \right. \quad (3.9)$$

となる。ここで、複素誘電率の実部を ε' 、虚部を ε'' とおくと

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon' = \frac{C}{C_0} \\ \varepsilon'' = \frac{G}{2\pi f C_0} \end{array} \right. \quad (3.10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon' = \frac{C}{C_0} \\ \varepsilon'' = \frac{G}{2\pi f C_0} \end{array} \right. \quad (3.11)$$

で表すことができる。なお、 C_0 は液晶を封入する前の液晶セルのキャパシタンスである。さらに式 3.9 より

$$C = \frac{V_m}{2\pi f R V_h} \sin\theta \quad (3.12)$$

となるので、式 3.10 ~ 3.12 より

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon' = \frac{V_m}{2\pi f R C_0 V_h} \sin\theta \\ \varepsilon'' = \frac{V_m}{2\pi f R C_0 V_h} \cos\theta \end{array} \right. \quad (3.13)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon' = \frac{V_m}{2\pi f R C_0 V_h} \sin\theta \\ \varepsilon'' = \frac{V_m}{2\pi f R C_0 V_h} \cos\theta \end{array} \right. \quad (3.14)$$

となり、式 3.13、3.14 から複素誘電率を得ることができる。液晶セルに駆動電圧を 0 V から 80 V にゆっくり変化させながら印加し、液晶セルの複素誘電率の駆動電圧依存性を測定した。

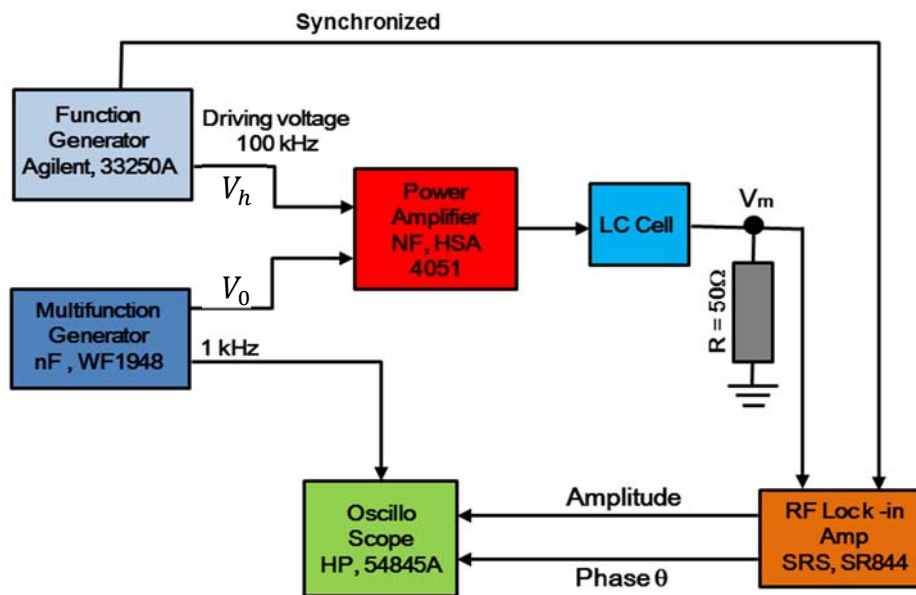


図 3.8 複素誘電率の駆動電圧依存性の測定系

3.5.2 パラレル配向処理とアンチパラレル配向処理の違い

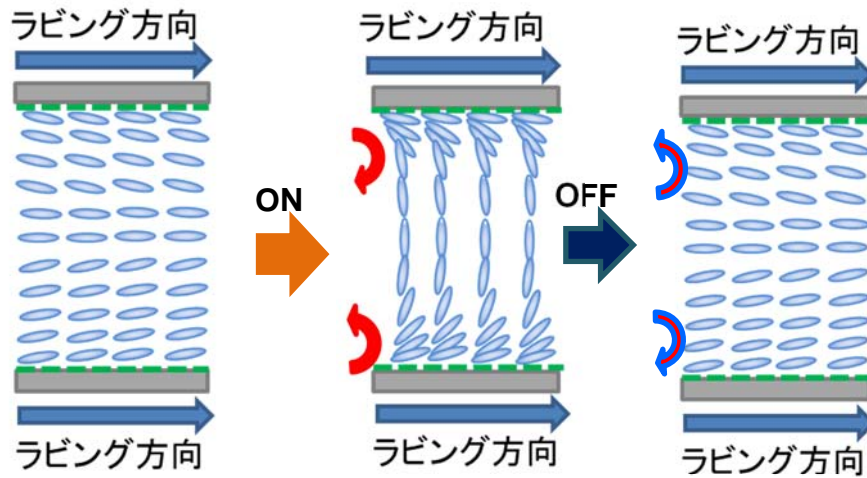


図 3.9 パラレルラビング配向処理

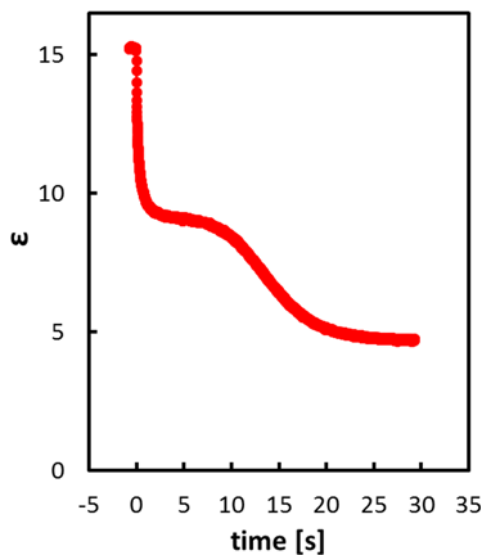


図 3.10 パラレルラビング配向処理セルの立ち下がり応答波形

3.2.1 節に述べたように、ITO ガラス平行平板セルの基板表面には配向用ポリイミドでポリイミド膜を成膜し、ラビング装置を用いてアンチパラレルラビング配向処理を行う。このラビング処理によって、ネマティック液晶分子がガラス表面に対して平行となる。液晶の立ち下がり応答時間に関して液晶層厚や駆動電界や高分子ネットワークなどの要素以外には配向方向にも影響を受けていると考えられる。

主にパラレルラビング配向処理とアンチパラレルラビング配向処理があるが、

ここでその二つのラビング配向処理の違いを述べ、本研究で用いたアンチパラレルラビング配向処理の理由を説明する。

図 3. 9 にパラレル配向処理セルの駆動電界印加・除去する際の液晶分子の様子を示すが、駆動電圧印加しないときに液晶分子が基板表面に対してラビング処理より与えられたプレチルト角を傾き、配向する。駆動電界を印加した直後は、上半分の液晶分子は右方向に回転し、下半分の液晶分子は左方向に回転し、再配向する。このとき、セル中央部の液晶分子は電界の方向にプレチルト角がほぼ 0° から 90° に右方向また左方向に回転し、再配向する。駆動電界が除去された際に配向規制力の働きより、上半分の液晶分子は左方向に回転し、下半分の液晶分子は右方向に回転し、再配向する。このとき、セル中央部の液晶分子が上半分および下半分の両方の液晶分子に同時に引っ張られる状態になるため、駆動電界を除去するとすぐに応答せず、少し遅れが出る。そのために 2 段階応答の現象が発生する。この 2 段階応答を図 3. 10 に示す立ち下がり応答波形において確認することができる。

また、図 3. 11 にアンチパラレル配向処理セルの駆動電界印加・除去する際の液晶分子の様子を示すが、駆動電圧印加しないときに液晶分子が基板表面に対してラビング処理より与えられたプレチルト角を傾き、配向する。駆動電界を印加した直後は、セル全体の液晶分子が右方向に回転し、再配向する。駆動電界が除去された際にセル全体の液晶分子がほぼ同時に左方向に回転し、再配向する。そのために、アンチパラレルラビング処理のガラス平行平板セルにおいて、駆動電界を除去した際に、液晶分子がほぼ同時に立ち下がり、立ち下がり応答波形に関してパラレルラビング配向処理よりもなめらかになる。これを図 3. 12 に示すアンチパラレルラビング配向処理セルの立ち下がり応答波形から確認することができる。これらの結果から本研究において全てアンチパラレルラビングを用いることにした。

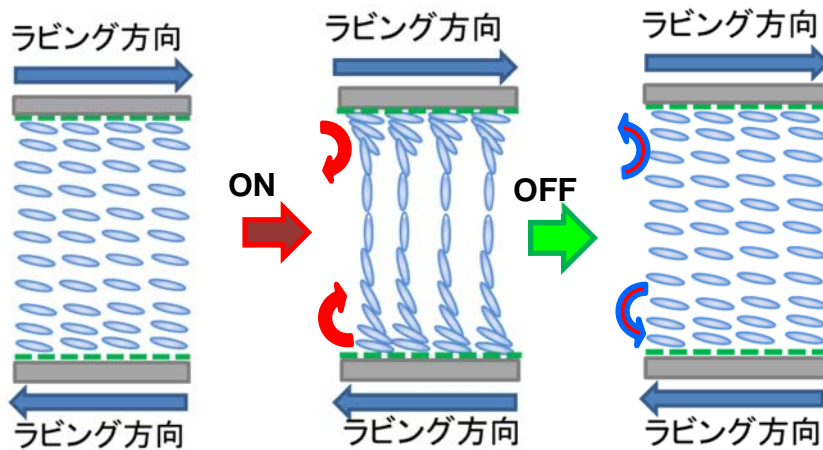


図 3.11 アンチパラレルラビング配向処理

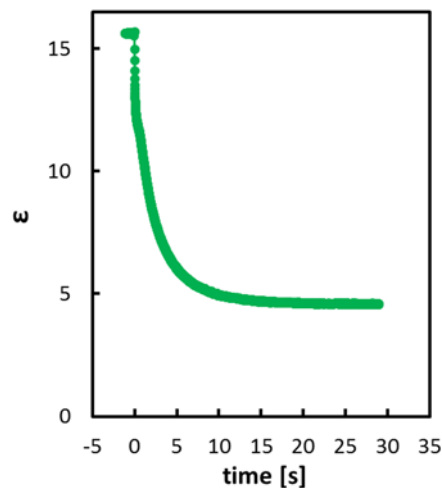


図 3.12 アンチパラレルラビング配向処理セルの立ち下がり応答波形

3.5.3 複素誘電率の駆動電圧依存性の測定結果および考察

液晶単体と光重合型 PSNLC の誘電異方性を把握するため、液晶単体、重合性モノマー濃度を 2 wt%、4 wt%、10 wt% および 15 wt% を添加した光重合型 PSNLC を装荷した液晶セルの誘電率の電圧依存性測定を実施した。その結果を図 3.13 に示す。図 3.13 により、液晶単体の液晶セルでは駆動電圧の印加後すぐに応答が始まり、約 20 V で飽和することが分かる。これに対して光重合型 PSNLC では、重合性モノマー濃度 2 wt% PSNLC の場合は液晶単体の液晶セルとほぼ同様に駆動電圧の印加後すぐに応答が始まり、約 80V で飽和する。重合性モノマー濃度が 4 wt% のもので閾値電圧は約 15 V となり、80 V の電圧を印加しても飽和

していないことがわかる。一方、重合性モノマー濃度が 10 wt% および 15 wt% PSNLC の場合は 80 V の駆動電圧を印加しても応答を確認することができなかった。この測定結果より重合性モノマー濃度が増加すると液晶分子の流動性が低下することにより閾値電圧が高くなり、飽和電圧が大きくなることを確認できた。これは高い重合性モノマー濃度により形成された高分子ネットワークが密となり、ネットワークの配向規制力は強く働くからであると考えられる。

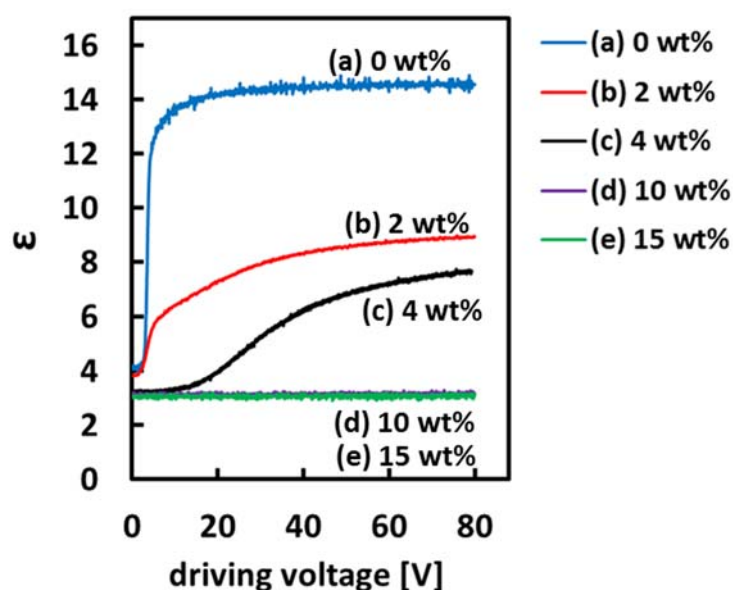
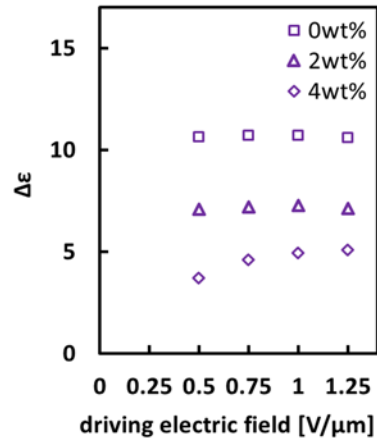


図 3.13 複素誘電率の駆動電圧依存性の測定結果

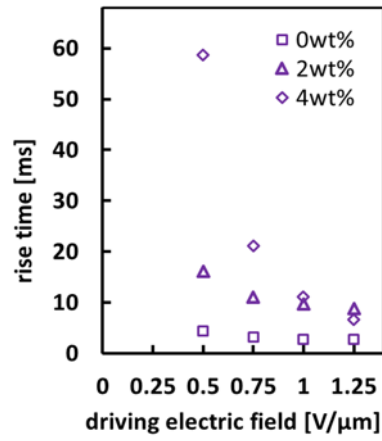
3.6 複素誘電率の過渡応答特性測定結果および考察

3.5.1 節に述べた測定系を使用し、液晶セルに駆動電圧をステップ状に印加・除去し、液晶セルの複素誘電率の過渡応答特性を測定した。その測定結果を図 3.14 に示す。図 3.14(a) に液晶単体と光重合性モノマー濃度 2 wt% および 4 wt% PSNLC を装荷した液晶セルの誘電率の変化量の測定結果を示す。重合性モノマー濃度が増加するとともに誘電率変化量が減少することがわかった。液晶単体と光重合性モノマー濃度 2 wt% および 4 wt% PSNLC を装荷した液晶セルの立ち上がり応答時間の測定結果を図 3.14(b) に示す。測定結果により、立ち上がり応答時間は駆動電界の増加に伴って短くなることを確認できた。また、重合性モノマー濃度が増加とともに長くなり、ある程度の大きい電界を加えるとほぼ一定で変化が小さいことがわかった。図 3.14(c) に液晶単体と光重合性モノマー濃度 2

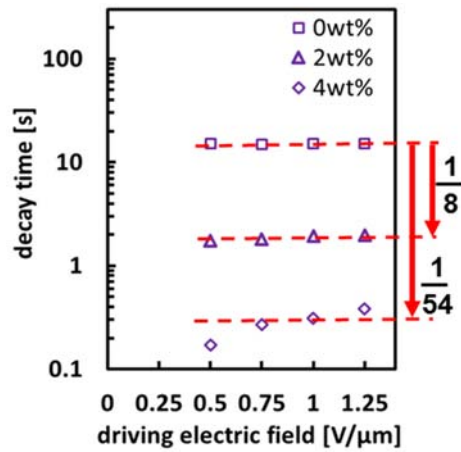
wt%および 4 wt% PSNLC を装荷した液晶セルの立ち下がり応答時間の測定結果を示す。立ち下がり応答時間については、液晶単体が約 15.2 s と非常に長くなっているのに対して、重合性モノマー濃度 2 wt% の光重合型 PSNLC では印加駆動電界に依存せず約 1.8 s と短くなっており、また重合性モノマー濃度 4 wt% の光重合型 PSNLC では電界に依存するものの最大でも 0.38 s とさらに短くなっている。この結果より重合性モノマー濃度 4 wt% の光重合型 PSNLC を使用することにより、立ち上がり応答時間は 60 ms 以下であり、立ち下がり応答時間は 0.38 s 以下であった。単体液晶と比べて誘電異方性は 43% に減少するものの、立ち下がり応答時間を 1/54 に短縮でき、液晶素子の応答改善において光重合型 PSNLC が有効であることを確認できた。



(a)



(b)



(c)

図 3.14 ネマティック液晶 ITO ガラス平行平板セルの測定結果
 (a)誘電率の変化量、(b)立ち上がり応答時間、
 (c)立ち下がり応答時間

3.7 光重合型PSNLC装荷CPW型移相器

3.7.1 光重合型 PSNLC 装荷 CPW 型移相器の作製

作製した光重合型 PSNLC 装荷 CPW 型移相器の構造を図 3.15 に示す。測定を実施する CPW 型移相器は、線路幅 $w = 300 \mu\text{m}$ 、ギャップ幅 $s = 50 \mu\text{m}$ 、液晶層厚 $d = 50 \mu\text{m}$ 、CPW 型移相器の中心導体線路長 $l = 10 \text{ mm}$ の条件で作製した。本実験で作製した CPW 型移相器では、液晶層上面にガラスを用いたため、一般的な紫外線照射による高分子化を実施し、駆動電界を $0.5 \text{ V}/\mu\text{m}$ から $1.25 \text{ V}/\mu\text{m}$ まで印加し測定した

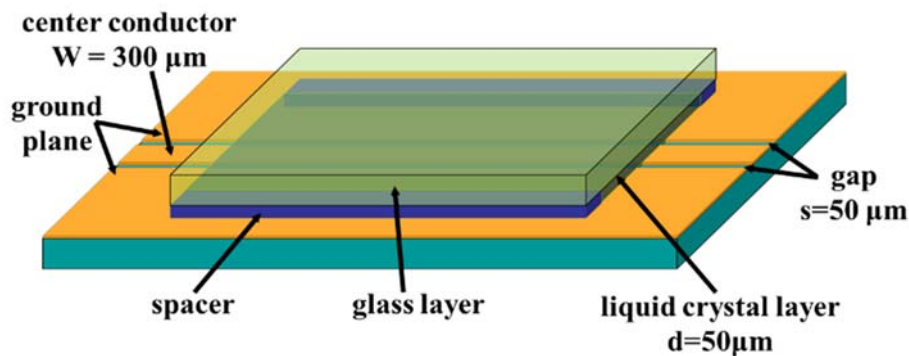


図 3.15 液晶装荷 CPW 型移相器の構造

3.7.2 光重合型 PSNLC 装荷 CPW 型移相器の移相特性および時間応答特性の評価

重合性モノマー濃度 4 wt% の光重合型 PSNLC 装荷 CPW 型移相器を作製し、位相変化の駆動電圧依存性を測定した。測定結果を図 3.16 に示す。この図には液晶単体の結果もあわせて示している。本研究では、位相変化および応答時間の駆動電界依存性の測定を周波数 20 GHz で実施した。図 3.16(a)より、液晶単体では印加駆動電界が $1.25 \text{ V}/\mu\text{m}$ のとき、最大値 $0.06 \text{ deg}/\text{GHz}\cdot\text{mm}$ の位相変化が得られた。一方、4 wt% 光重合型 PSNLC では同様に印加駆動電界が $1.25 \text{ V}/\mu\text{m}$ のときに最大値の位相変化が $0.016 \text{ deg}/\text{GHz}\cdot\text{mm}$ となり、液晶単体の 28% となった。位相変化については第 2 章 2.2.2 節の式(2.2)で述べたように、式：

$$\Delta\varphi_{(V)} = 2\pi f \frac{l}{c} (\sqrt{\varepsilon_{\parallel}} - \sqrt{\varepsilon_{\perp}})$$

で計算されるため、位相変化の減少は $\Delta\varepsilon$ の減少によるものである。この $\Delta\varepsilon$ の減少については、ITO ガラス平行平板セルでの複素誘電率の測定でも確認しており、

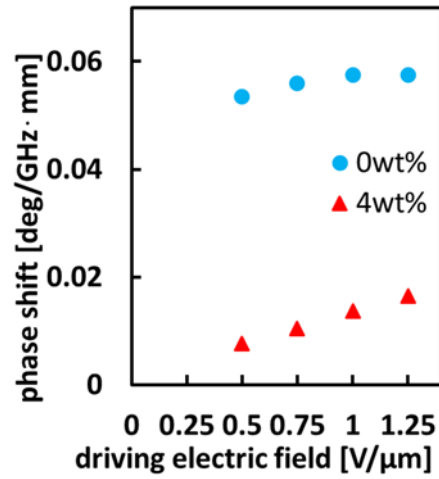
添加した重合性モノマーの高分子化により、閾値電圧が増加するとともに高分子周辺での液晶分子の応答が抑制されることによる $\Delta\varepsilon$ の減少によるものであると考えられる。また、印加駆動電界による位相変化をみると、液晶単体では印加駆動電界が $0.5 \text{ V}/\mu\text{m}$ の電界のとき $0.054 \text{ deg}/\text{GHz}\cdot\text{mm}$ で $1.25 \text{ V}/\mu\text{m}$ の電界のとき $0.06 \text{ deg}/\text{GHz}\cdot\text{mm}$ であり、駆動電界の増加により位相変化の増加量は $0.006 \text{ deg}/\text{GHz}\cdot\text{mm}$ 、すなわち 10% の位相変化であるが、4 wt% 光重合型 PSNLC では同様に $0.5 \text{ V}/\mu\text{m}$ の電界のとき $0.008 \text{ deg}/\text{GHz}\cdot\text{mm}$ で $1.25 \text{ V}/\mu\text{m}$ の電界のとき $0.016 \text{ deg}/\text{GHz}\cdot\text{mm}$ であり、駆動電界の増加により位相変化の増加量は $0.008 \text{ deg}/\text{GHz}\cdot\text{mm}$ 、すなわち 50% の位相変化であった。この結果より、4 wt% 光重合型 PSNLC 装荷 CPW 型移相器において位相変化は小さいものの、印加駆動電界による位相変化量の制御については液晶単体に比べて容易であると考えられる。しかし、4 wt% 光重合型 PSNLC を使用したときの位相変化の最大値が $0.016 \text{ deg}/\text{GHz}\cdot\text{mm}$ であり、これは測定周波数 20 GHz で中心導体線路長 10 mm における位相変化量が約 3.2° であることから小さい値であることがわかる。

液晶単体および 4 wt% 光重合型 PSNLC 装荷 CPW 型移相器の立ち上がり応答時間および立ち下がり応答時間の印加駆動電界依存性をそれぞれ図 3.16(b) および図 3.16(c) に示す。図 3.16(b) より、立ち上がり応答時間について、液晶単体では特に印加駆動電界が低い場合において、数百 ms となった。これは、液晶層の電界が強い中心導体と接地面間のギャップ部分の液晶分子は応答が完了した状態であっても、それ以外の電界が微弱である部分の液晶分子がわずかながら応答を続けており、結果的に全体としての立ち上がり応答時間が長くなったものだと考えられる。光重合型 PSNLC では、重合性モノマー濃度 4 wt% のものが印加駆動電界 $0.5 \text{ V}/\mu\text{m}$ において応答時間が 1 s 以上になった。これは、ITO ガラス平行平板液晶セルの測定でも確認できているように、閾値電圧の増加によるものであると考えられる。また、立ち上がり応答時間に関しては液晶単体の場合には印加駆動電界 $1.25 \text{ V}/\mu\text{m}$ のときに 63 ms となり、4 wt% 光重合型 PSNLC の場合には 220 ms となり、約 3.5 倍と長くなったことがわかる。

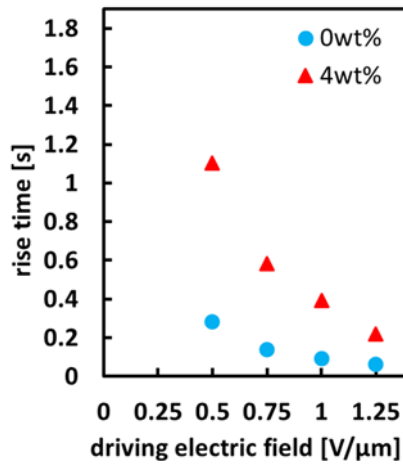
一方、立ち下がり応答時間に関しては、図 3.16(c) に示すように、印加駆動電界 $1.25 \text{ V}/\mu\text{m}$ において液晶単体使用の場合は 14 s であるのに対し、4 wt% 光重合型 PSNLC 使用の場合は立ち下がり応答時間は約 1.27 s であり、液晶単体に比べて立ち下がり応答時間は約 13 分の 1 に短縮された。ここで、液晶単体の立ち

下がり応答時間について着目すると、ITO ガラス平行平板液晶セルでは 15.2 s であったのに対し、CPW 型移相器では約 14 s である。また、これについては ITO ガラス平行平板液晶セルの液晶層厚は CPW 型移相器の液晶層厚と等しく 50 μm であり、式 (3.6) の立ち下がり応答時間にも示したように、液晶単体については ITO ガラス平行平板セルと CPW 型移相器における立ち下がり応答時間は、ほぼ理論に基づいた変化をしていると考えられる。4 wt% 光重合型 PSNLC の場合は ITO ガラス平行平板液晶セルでは 0.29 s であったのに対し、CPW 型移相器では 1.04 s であり、約 3.6 倍大きい。4 wt% 光重合型 PSNLC を用いる場合には、高分子混合比や重合条件が同じであれば同様の高分子ネットワークが形成され、立ち下がり応答時間についての変化がないのが理想である。しかし、前述したように ITO ガラス平行平板液晶セルと CPW 型移相器では約 3.6 倍の違いがあり、液晶層内に形成されている高分子ネットワークの密度や均一性が、ITO ガラス平行平板液晶セルと CPW 型移相器で異なっているためであると考えられる。

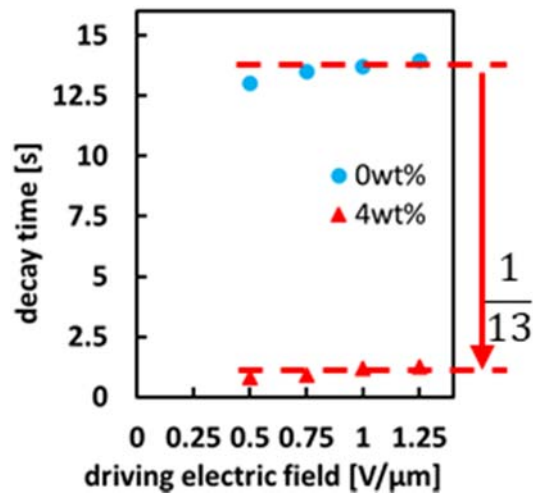
以上の考察結果より、重合性モノマー濃度 4 wt% 光重合型 PSNLC を用いることで液晶装荷 CPW 型移相器において、立ち上がり応答時間と立ち下がり応答時間は約 1 s であり、光重合型 PSNLC による応答時間の改善効果を確認できた。本研究における液晶装荷移相器の応答時間の目標は 1 s 以下であり、応答時間に関する目標はほぼ達成できたと言える。一方、伝送線路の線路長は 10 mm であり、測定周波数は 20 GHz であるため、このときの位相変化量が約 3.2° である。この位相変化量は大きな位相変化を必要としないデバイスにおいては問題ないが、位相変化量が求められるデバイス、例えば位相変化量 360° を有する液晶装荷 CPW 型移相器を実現する必要がある場合には、伝送線路長は約 120 倍、すなわち 1200 mm に設計する必要があるため、非常に長いデバイスとなる。一般的に、長い線路長のデバイスを小型化する方法として、線路をメアンダーラインとする方法が用いられるが、CPW 型移相器の構造において中心導体線路と接地導体面が同一平面にあるためメアンダーラインとすることは困難であるため、光重合型 PSNLC を用いた CPW 型移相器を大きな位相変化量を必要とするデバイスに応用することは困難であると言える。



(a)



(b)



(c)

図 3.16 液晶装荷 CPW 型移相器の測定結果 (a)位相変化、(b)立ち上がり応答時間、(c)立ち下がり応答時間

3.8 光重合型 PSNLC 装荷 MSL 型移相器

3.8.1 光重合型 PSNLC 装荷 MSL 型移相器の作製

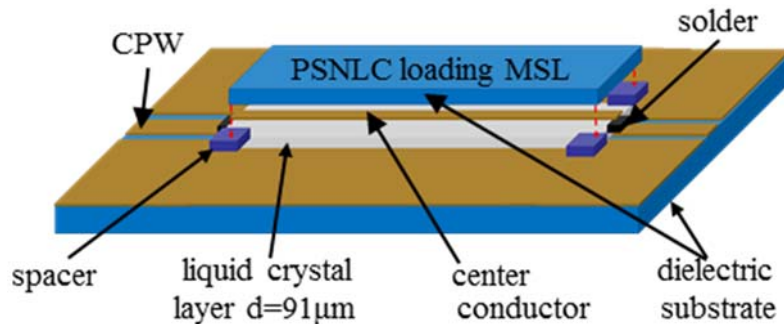


図 3.17 液晶装荷 MSL 型移相器の構造

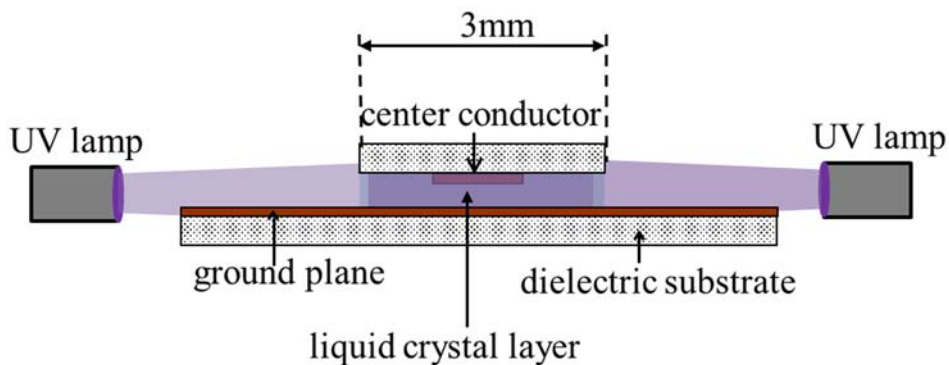


図 3.18 側面紫外線照射による高分子化

図 3.17 は液晶装荷 MSL 型移相器の構造を示す。液晶を用いるために下部基板の 4 隅にそれぞれ厚さ $100\ \mu\text{m}$ のスペーサに設置し、上部基板と下部基板の間隔 $100\ \mu\text{m}$ で固定されている。銅箔の厚さは $9\ \mu\text{m}$ であるため、液晶層厚は $91\ \mu\text{m}$ と計算し、実験を実施した。図 3.18 は本研究で提案する光重合型 PSNLC 装荷 MSL 型移相器の側面から一般的な紫外線照射による高分子安定化方法を示す。この方法を実施できるように、上部基板幅を $3\ \text{mm}$ と細く作製した。液晶材料としては重合性モノマー濃度 $4\ \text{wt}\%$ 、 $10\ \text{wt}\%$ および $15\ \text{wt}\%$ 光重合型 PSNLC であった。紫外線装置に関して UV-LED スポット光源 (HAMAMATSU, LC-C1V3L11921) を使用し、出力強度 1% (約 $9.7\ \text{mW}/\text{cm}^2$) を設定した。LED ヘッドとデバイスとの距離を $50\ \text{mm}$ を保ち、 15 分間連続照射することにより液晶層内に高分子ネットワークを施した。

3.8.2 光重合型 PSNLC 装荷 MSL 型移相器の移相特性および時間応答特性の評価

CPW 型移相器の場合と同様に、測定周波数は 20 GHz とした。液晶単体および光重合型 PSNLC 装荷 MSL 型移相器の位相変化の駆動電界依存性、立ち上がり応答時間および立ち下がり応答時間をそれぞれ図 3.19(a)、図 3.19(b)、および図 3.19(c)に示す。CPW 型移相器の測定結果から、当初 4 wt%の光重合型 PSNLC を使用して MSL 型移相器に装荷し、位相変化および応答時間の改善を試みたが、MSL 型移相器の測定結果からわかるように、液晶単体の測定結果と比べほぼ変化せず、改善がほとんど見られなかった。そこで光重合性モノマー濃度を増やし、10 wt%および 15 wt%の光重合型 PSNLC を調製し、MSL 型移相器に装荷し応答改善を試みた。

位相変化については、図 3.19(a)に示すように液晶単体では印加駆動電界が $1.25 \text{ V}/\mu\text{m}$ のとき最大値 $0.133 \text{ deg}/\text{GHz}\cdot\text{mm}$ の結果が得られた。一方、15 wt%光重合型 PSNLC では同様に印加駆動電界が $1.25 \text{ V}/\mu\text{m}$ のときに最大値の位相変化が $0.031 \text{ deg}/\text{GHz}\cdot\text{mm}$ となり、液晶単体の 23.3%となった。この測定結果より CPW 型移相器の 4 wt%光重合型 PSNLC の最大位相変化である $0.016 \text{ deg}/\text{GHz}\cdot\text{mm}$ と比較すると、MSL 型移相器の位相変化が約 2 倍大きいことがわかった。

液晶単体および光重合型 PSNLC 装荷 MSL 型移相器の立ち上がり応答時間および立ち下がり応答時間の印加駆動電界依存性を図 3.19 (b)および図 3.19(c)に示す。図 3.19 (b)より、立ち上がり応答時間について、液晶単体の場合には印加駆動電界 $1.25 \text{ V}/\mu\text{m}$ のときに 48 ms であったが、15 wt%光重合型 PSNLC の場合には 270 ms となり、約 5.63 倍と長くなったことがわかる。また、立ち下がり応答時間に関しては、図 3.19(c)に示すように印加駆動電界 $1.25 \text{ V}/\mu\text{m}$ において液晶単体装荷の場合の 48.68 s に対して、15 wt%光重合型 PSNLC 装荷の場合は立ち下がり応答時間は約 0.6 s であり、液晶単体と比べ立ち下がり応答時間は約 59 分の 1 となった。

ここで、CPW 型移相器の場合と同様に液晶単体の立ち下がり応答時間について着目すると、ITO ガラス平行平板液晶セルでは 15.2 s であったのに対し、MSL 型移相器では約 48.68 s であり、約 3.2 倍であることがわかる。これについては ITO ガラス平行平板液晶セルの液晶層厚は $50 \mu\text{m}$ であるのに対して MSL 型移相器は $91 \mu\text{m}$ であり、式 (3.2) から液晶層厚が 1.82 倍厚いと立ち下がり応答時間は 3.3 倍長くなるということが分かるように、液晶単体については ITO ガラス

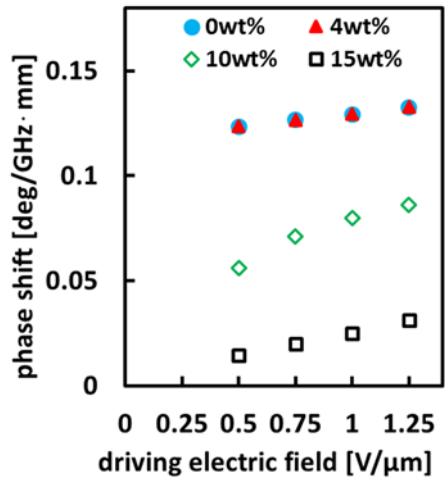
平行平板液晶セルと MSL 型移相器における立ち下がり応答時間は、ほぼ理論に基づいた変化をしていると言える。

一方、4 wt%光重合型 PSNLC の場合は、4 wt%光重合型 PSNLC 装荷 ITO ガラス平行平板液晶セルでは 0.38 s であったのに対し、4 wt%光重合型 PSNLC 装荷 MSL 型移相器では 46.68 s であり、液晶単体装荷 MSL 型移相器とほぼ等しい。3.7.2 節で述べたように、光重合型 PSNLC 装荷の場合については、高分子混合比や重合条件が同じであれば同様の高分子ネットワークが形成され、立ち下がり応答時間についての変化がないのが理想である。この改善度の低い理由としては、液晶装荷 MSL 型移相器の場合、側面から紫外線照射による高分子化を行ったため、外側の高分子ネットワークが密となり、中心導体線路直下の部分に高分子ネットワークがほとんど形成できなかつたためであると考えられる。また、3.6 節に述べたように ITO ガラス平行平板セルでは、4 wt%光重合型 PSNLC を使用することにより立ち下がり応答時間が 0.38 s に減少しており、液晶単体と比べ 54 分の 1 に改善することができている。これに対して、前述したように、MSL 型移相器では 15 wt%光重合型 PSNLC を使用することにより立ち下がり応答時間が 0.6 s に減少することができ、単体液晶と比べ 59 分の 1 に改善することができた。この様に ITO ガラス平行平板セルの 4 wt%光重合型 PSNLC の立ち下がり応答時間の改善の割合が MSL 型移相器の 15 wt%光重合型 PSNLC の改善の割合とほぼ同程度であることから、液晶装荷 MSL 型移相器の中心導体線路直下の部分に実際に形成された高分子ネットワークの密度は、4 wt%光重合型 PSNLC を使用した時の ITO ガラス平行平板セルと同程度の密度であると推測することができる。

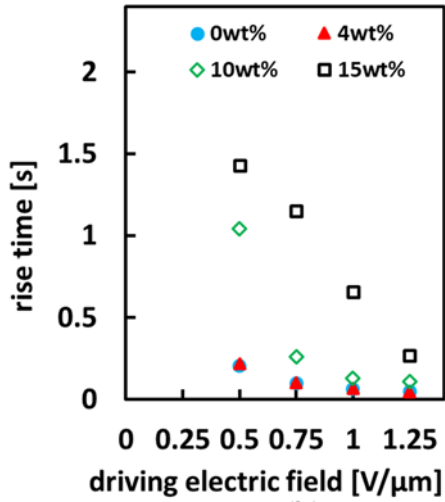
液晶装荷 CPW 型移相器と同様に、それぞれの印加駆動電界における位相変化をみると、液晶単体では駆動電界 $0.5 \text{ V}/\mu\text{m}$ のとき $0.123 \text{ deg}/\text{GHz}\cdot\text{mm}$ で $1.25 \text{ V}/\mu\text{m}$ のとき $0.132 \text{ deg}/\text{GHz}\cdot\text{mm}$ となり、駆動電界による位相変化の変化量は $0.009 \text{ deg}/\text{GHz}\cdot\text{mm}$ で 6.8%であった。一方光重合型 PSNLC の場合は、重合性モノマー濃度が 15 wt%のもので $0.5 \text{ V}/\mu\text{m}$ のとき $0.014 \text{ deg}/\text{GHz}\cdot\text{mm}$ 、 $1.25 \text{ V}/\mu\text{m}$ のとき $0.031 \text{ deg}/\text{GHz}\cdot\text{mm}$ であり、駆動電界による位相変化の変化量は $0.017 \text{ deg}/\text{GHz}\cdot\text{mm}$ で 55%であった。これらの結果から駆動電界により制御できる位相変化は、光重合型 PSNLC 装荷 CPW 型移相器の場合と同様に、液晶装荷 MSL 型移相器において液晶単体よりも光重合型 PSNLC の方が大きいことが確認でき

た。ただし、位相変化量そのものは液晶単体が最も大きく、重合性モノマー濃度を増加すると減少することが確認できた。液晶装荷 CPW 型移相器に比べ液晶装荷 MSL 型移相器の方が、応答時間の改善には高い濃度の高分子の添加が必要であったが、これは MSL 型移相器には側面から紫外線を照射したため、中心導体線路側面の高分子ネットワークが密となり、線路直下に必要な高分子ネットワークを構築するためであると考えられ、同程度に応答時間を改善したときの位相変化は CPW 型より約 2 倍大きく、MSL 型移相器の方が効率が良いことが確認出来た。

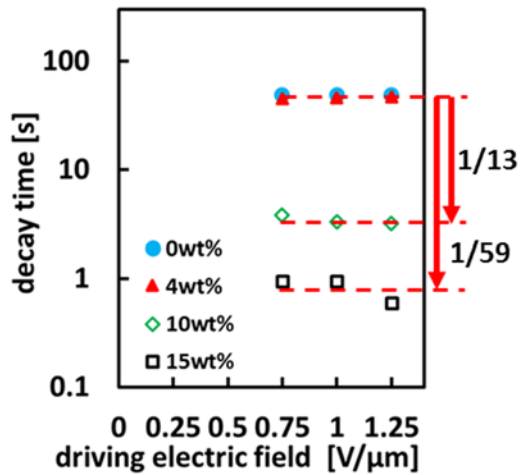
以上の考察結果より、15 wt%の光重合型 PSNLC を使用することで液晶装荷 MSL 型移相器において、立ち上がり応答時間と立ち下がり応答時間は 1 s 以下であり、光重合型 PSNLC による応答時間の改善効果を確認でき、本研究の目標の応答時間 1 s 以下を達成したといえる。中心線路導体の線路長は 10 mm であり、測定周波数は 20 GHz であるため、このときの位相変化量が CPW 型移相器より 2 倍大きく約 6.2° である。位相変化量 360° を有する液晶装荷 MSL 型移相器を実現するためには中心導体線路長約 60 倍を延長する、すなわち伝送線路長を 600 mm に設計する必要がある、この長さは CPW 型の半分とはいえまだ長い。しかし、液晶装荷 CPW 型移相器と違って、液晶装荷 MSL 型移相器において中心導体線路は上部基板にあり、接地導体面と独立するため、メアンダーライン型構造を利用して線路長を短縮することは十分に可能性がある。このとき、紫外線照射による高分子化を実現し、高分子ネットワークを均一に形成できるように、中心導体線路であるメアンダーラインを持つ基板に穴を施す必要がある。また、基板材料を選定し、銅箔メアンダーラインが付く透明な基板を実現できればより均一な高分子ネットワークが形成され、重合性モノマー濃度さえ減少することができ、最適であると考えられる。したがって、光重合型 PSNLC の効果を発揮し、実際のデバイスに応用する点において、MSL 型移相器の方が適当であると考えられる。



(a)



(b)



(c)

図 3.19 液晶装荷 MSL 型移相器の測定結果 (a)位相変化、(b)立ち下がり応答時間、(c)立ち下がり応答時間

3.9 3本線平行平板セルにおける高分子ネットワーク形成の確認

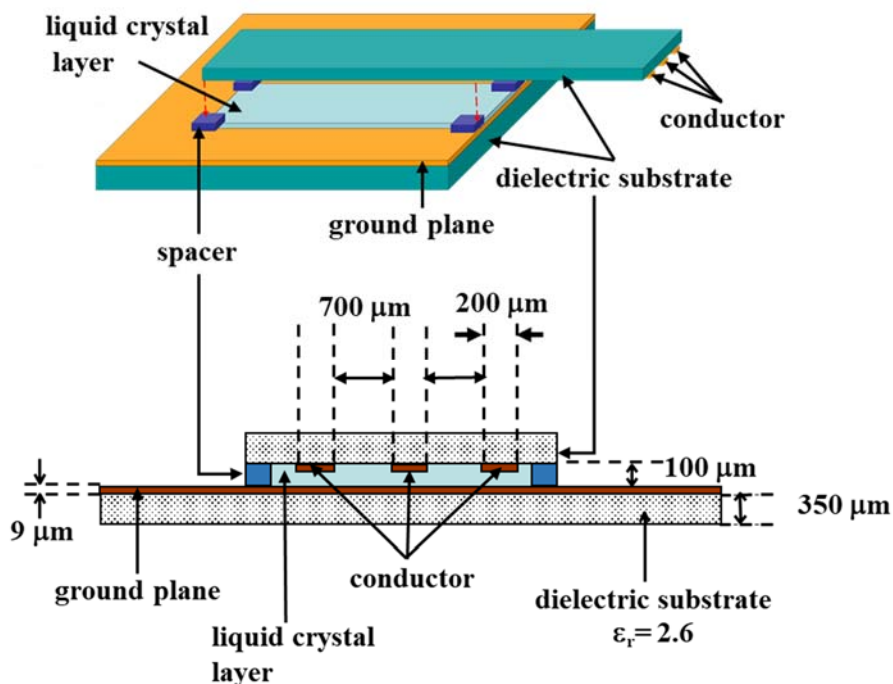


図 3.20 3本線平行平板液晶セルの構造

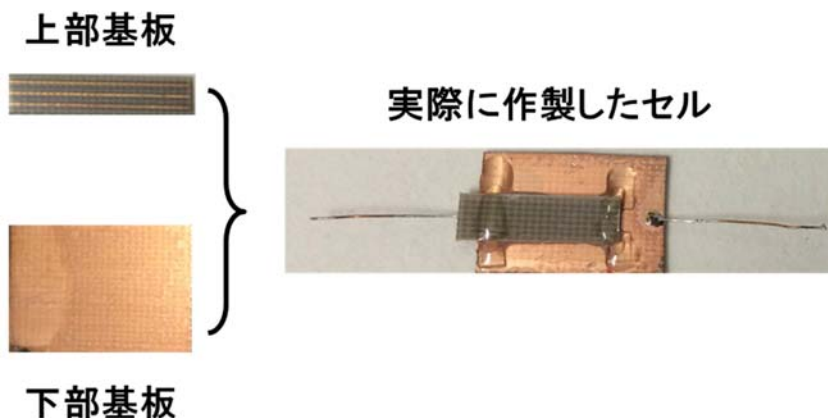


図 3.21 実際に作成した3本線平行平板セル

前節で、MSL 型移相器において応答時間を改善するためには、高い濃度の重合性モノマーの添加が必要であった(15 wt%光重合型 PSNLC)。理由としては移相器の側面紫外線照射するため、中央部よりも外側の方が高分子ネットワークが形成されたとの説明を行った。本節では、この仮説の検証を行うため、3本の上部電極を有する平行平板セルを作製し、左右にある線路直下の部分の応答時間と中央部にある線路直下の応答時間の違いを確認した。

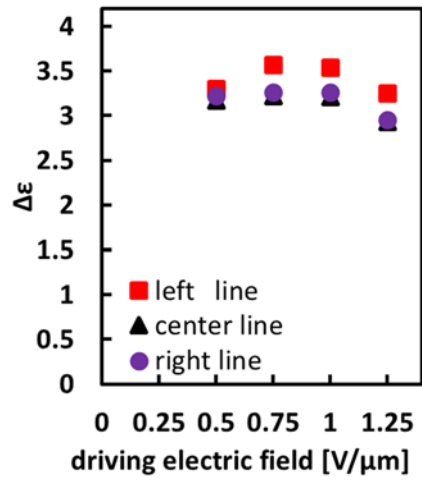
3 本線平行平板液晶セルの構造を図 3. 20 に示す。上部基板および下部基板の両方とも高周波用誘電体基板(日本ピラー工業, NF260A)である。上部基板の幅を 3 mm にし、その上に幅 200 μm の 3 本線が間隔 700 μm を設ける。液晶と接する両界面にはポリイミド配向膜(AL1254,JSR)をスピンコート法により形成し、アンチパラレルラビング処理を施す。その後、誘電体基板の 2 枚の間にスペーサとして 100 μm の PET フィルムを挟み込み、接着した。実際に作製した 3 本線平行平板液セルを図 3. 21 に示す。

作製した 3 本線平行平板セルに液晶単体および 15 wt% 光重合型 PSNLC を注入し、光重合型 PSNLC 装荷 MSL 型移相器と同様にデバイスの側面から 15 分間で紫外線照射により、高分子化を行った。3.5 節で述べた複素誘電率測定系を利用して、液晶単体装荷 3 本線平行平板セルおよび 15 wt% 光重合型 PSNLC の左線、中央線および右線の複素誘電率の過渡応答特性測定を行った。

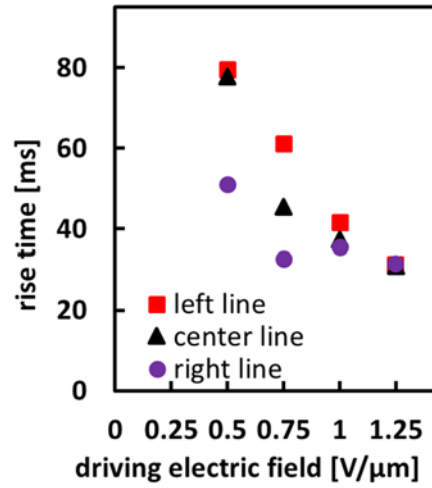
液晶単体装荷 3 本線平行平板セルの誘電異方性、立ち上がり時間および立ち下がり時間の測定結果を図 3. 22(a)、図 3. 22(b)、図 3. 22(c)に示す。図 3. 22 (a)の結果より、駆動電界を変化しても誘電率の変化量がほとんど変わらないことがわかった。また、左線、中央線および右線の誘電率の変化量がほぼ等しいことを確認できた。図 3. 22(b)に示した立ち上がり応答時間は誘電率の変化量の測定結果と同様に左線、中央線および右線の立ち上がり応答時間がほぼ等しいことを確認することが出来た。同様に図 3. 22(c)に示すように、左線、中央線および右線の立ち下がり応答時間がほぼ等しいことを確認することが出来た。これらの結果から、3 本線平行平板セルにおいて液晶単体を装荷する場合には、誘電率の変化量、立ち上がり応答時間および立ち下がり応答時間が測定する位置に依存しないことが分かった。

次に図 3. 23(a)に 15 wt% 光重合型 PSNLC を装荷する 3 本線平行平板液晶セルの誘電率の変化量の測定結果を示す。測定結果から駆動電界が変化するとともに変化するがその変化が液晶単体と比べ小さいことがわかった。また、左線および右線の誘電率の変化量より中央線の誘電率の変化量の方が大きいことを確認できた。図 3. 23(b)に立ち上がり時間の測定結果を示すが、駆動電界が増加するとともに立ち上がり応答時間が減少していることが分かった。左線、中央線および右線の立ち上がり応答時間を比較すると、左線と右線の立ち下がり応答時間がほぼ等しく、中央線の立ち上がり時間より長いことを確認できた。一方、立ち

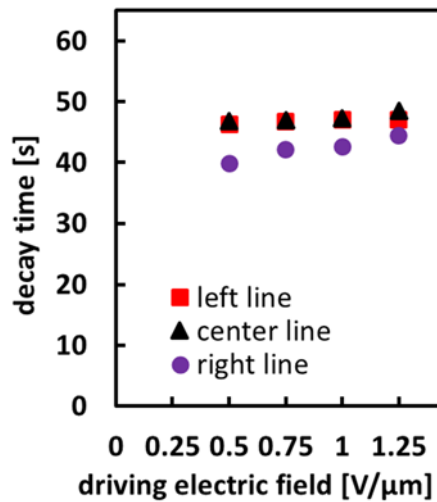
下がり応答時間の測定結果を図 3. 23(c)に示すが、左線と右線の立ち下がり応答時間が中央線の立ち下がり応答時間より短いことを確認出来た。これらの結果から、前節で説明した仮説が裏付けられたといえる。



(a)

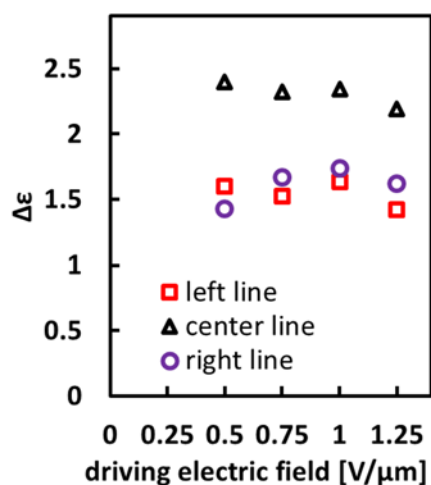


(b)

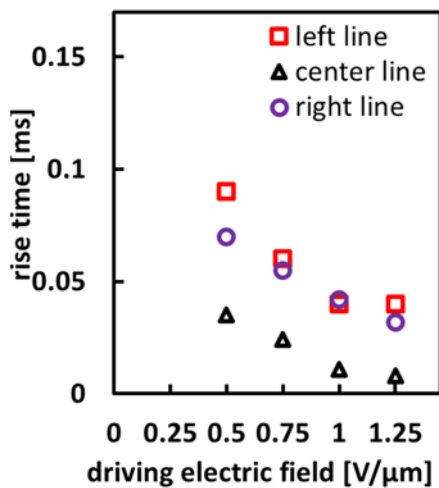


(c)

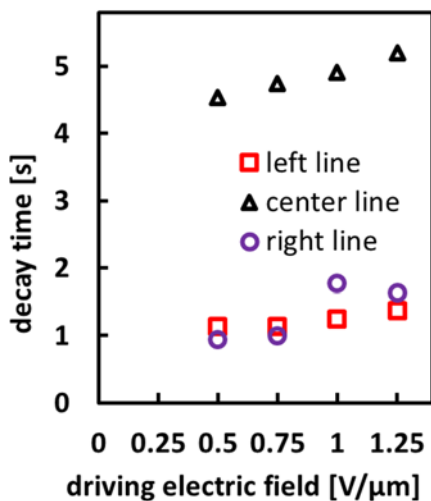
図 3.22 液晶単体装荷 3 本線平行平板セルの測定結果 (a)誘電異方性、(b)立ち上がり応答時間、(c)立ち下がり応答時間



(a)



(b)



(c)

図 3.23 15 wt%光重合型 PSNLC を装荷する 3 本線平行平板液晶セルの測定結果 (a)誘電率変化量、(b)立ち上がり応答時間、(c)立ち下がり応答時間

3.10 まとめ

本章では、液晶装荷 CPW 型および MSL 型マイクロ波ミリ波移相器の立ち下がり応答時間の改善方法として、光重合型高分子安定化ネマティック液晶 (Polymer Stabilized Nematic Liquid Crystal : PSNLC) を取り上げ、立ち下がり応答時間の改善の検討を行った。はじめに、高分子安定化ネマティック液晶の基礎について、立ち下がり応答時間の改善の原理を説明するとともに、調製方法や調製過程等について述べた。次に、テストセルとして ITO ガラス平行平板セルの作製過程、液晶分子の初期配向方向を寄与するラビング過程のラビング方向の違いについて説明した。また、作製した ITO ガラス平行平板液晶セルを用い光重合型 PSNLC の重合性モノマー濃度による複素誘電率の駆動電圧依存性および過渡応答特性への影響等について実験で検討した結果について説明した。光重合型 PSNLC を装荷した場合には、立ち下がり応答時間は大きく改善されたが全ての液晶セルにおいて閾値電圧が大きくなり、 $\Delta\epsilon$ は小さくなることを確認できた。

光重合型 PSNLC を装荷するためのマイクロ波ミリ波移相器を CPW 型移相器および MSL 型移相器の 2 種類作製し、CPW 型移相器には上部基板から紫外線照射により高分子化させ、MSL 型移相器には側面から紫外線照射により高分子化させ、それぞれの位相変化の印加駆動電界依存性および応答時間の評価を実施した。立ち上がり応答時間および立ち下がり応答時間が 1 s 程度であり、両方の移相器とも光重合型 PSNLC による応答改善を確認できた。具体的に、CPW 型移相器においては、4 wt% 光重合型 PSNLC を使用することにより、液晶単体と比べ立ち下がり応答時間は 13 分の 1 に改善ができたが位相変化は 73% 減少し、最大値は 0.016 deg/GHz \cdot mm であった。一方、MSL 型移相器において 15 wt% 光重合型 PSNLC を使用することにより、液晶単体と比べ立ち下がり応答時間は 59 分の 1 に改善ができ、位相変化は 77% 減少したが最大値は約 0.031 deg/GHz \cdot mm であった。CPW 型移相器に比べ MSL 型移相器の方が、応答時間の改善には高い濃度の高分子の添加が必要であったが、これは MSL 型には側面から紫外線を照射したため、線路側面の高分子ネットワークが密となり、線路直下の高分子ネットワーク密度が低下するためであることが確認することが出来た。また、同程度に応答を改善した CPW 型移相器と MSL 型移相器の位相変化を比べると、MSL 型移相器の方が約 2 倍大きく、MSL 型移相器の方が効率が高いことが確認

出来た。実際のデバイスに応用する観点から、液晶装荷 MSL 型移相器の方が容易に応用でき、より大きな位相変化量が得られることがわかった。最後に、3 本線平行平板を使用し検討を行った結果、中央線路直下よりも両側の線路直下の方が高分子ネットワークが密となり、MSL 型移相器における高分子ネットワーク形成の場所依存性を確認できた。

第 4 章

液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器

4.1 はじめに

現状の通信環境では携帯電話や衛星通信の進歩により、無線を用いた大容量かつ高速通信が可能になっており、通信量および無線機器の設置数が増加している。その結果、通信量が増加し、周波数帯域の飽和による混信が発生し、通信障害等も頻繁に起きている。そのため、新たな周波数領域の活用を検討する必要があり、未開拓周波数領域と言われるテラヘルツ波領域が期待されている [69, 70]。第 2 章および第 3 章で説明した MSL 型および CPW 型伝送線路はマイクロ波ミリ波領域において実績があるが、テラヘルツ波領域に大きな伝送損失がもたらされる [71]。そのため、新たな伝送線路の検討も必要であると考えられる。ミリ波やテラヘルツ波領域で使用可能な導波路として NRD ガイド(Non-Radiative Dielectric Waveguide)があり、線路の曲がりや不連続部分で不要な放射波が発生しない、かつ誘電体線路本来の低損失の特性を有している。そこで、NRD ガイドの誘電体としてネマティック液晶を取り上げ、周波数が 260 ~ 400 GHz のテラヘルツ波帯における液晶装荷移相器を初めて提案し、その特性について検討した。

本章では、テラヘルツ波の概要および基本 NRD ガイドの構造について説明するとともに、その動作原理について述べる。次にネマティック液晶 5CB を用いた NRD ガイドの構造を説明し、テラヘルツ波測定系による測定結果について述べる。

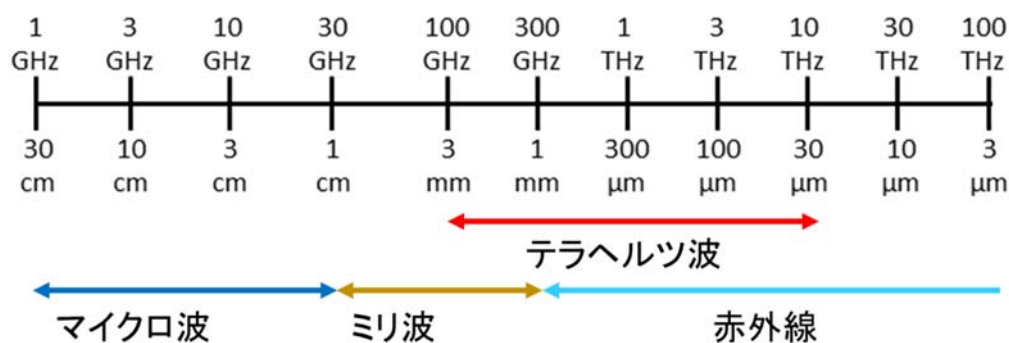


図 4.1 テラヘルツ波帯

4.2 テラヘルツ波の概要

4.2.1 テラヘルツ波の定義

テラヘルツ波は周波数 1 THz 前後の電磁波を指し、一般的に周波数 100 GHz ~ 10 THz の電磁波であると定義されることが多い[89]。この周波数領域は光波と電波の中間に位置するため、テラヘルツ波は光としての特性と電波としての特性の両方をあわせ持つことが知られている。一般に光学測定系の構築が可能という特徴を持つが、光波の観点から考えるとテラヘルツ波は光より周波数が低いため、レーザー発振や光子の検出が困難である。一方、電磁波の観点から考えるとテラヘルツ波はマイクロ波ミリ波より周波数が高いため、発振器の出力や検出器の変換効率が著しい低下が起こる。現状においては、光波と電波の両方ともに十分な研究が行われ、技術が確立しているが、テラヘルツ波領域は十分な研究が行われているとはいえない。

4.2.2 テラヘルツ波の応用

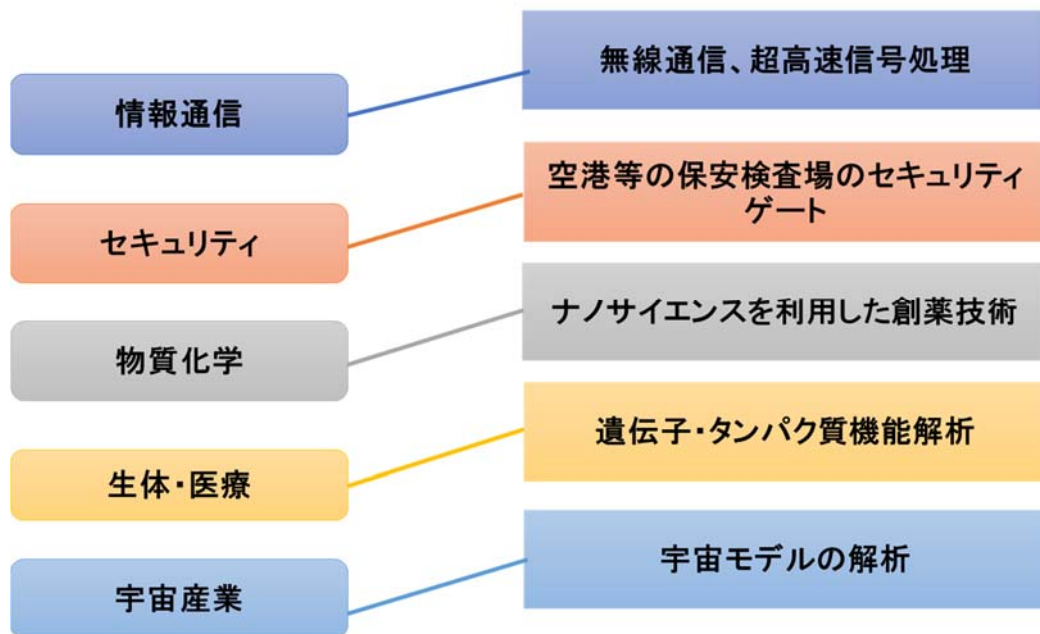


図 4.2 テラヘルツ波のあらゆる応用分野

上述したように、テラヘルツ波はその周波数から発振・検出が非常に困難である。近年のチタンサファイアレーザー技術の急激に発展のため、安定したフェムト秒オーダーの超短パルスが簡単に安価で利用できるようになり、パルス中にテラヘルツ波を含むことからそちらを利用したテラヘルツ波の研究が行われるようになった。その後、研究が進むにつれて、テラヘルツ波の有効性が多く発見されており、その応用範囲は情報通信分野にのみならず、セキュリティ

分野における空港等の保安検査場の危険物検査や違法薬物検査、物質科学分野におけるナノサイエンスを利用した創薬技術、生体・医療の分野における遺伝子・タンパク質機能解析、宇宙産業分野における宇宙モデルの解析などあらゆる分野に応用が行われている。

4.2.3 テラヘルツ波による位相変化の原理

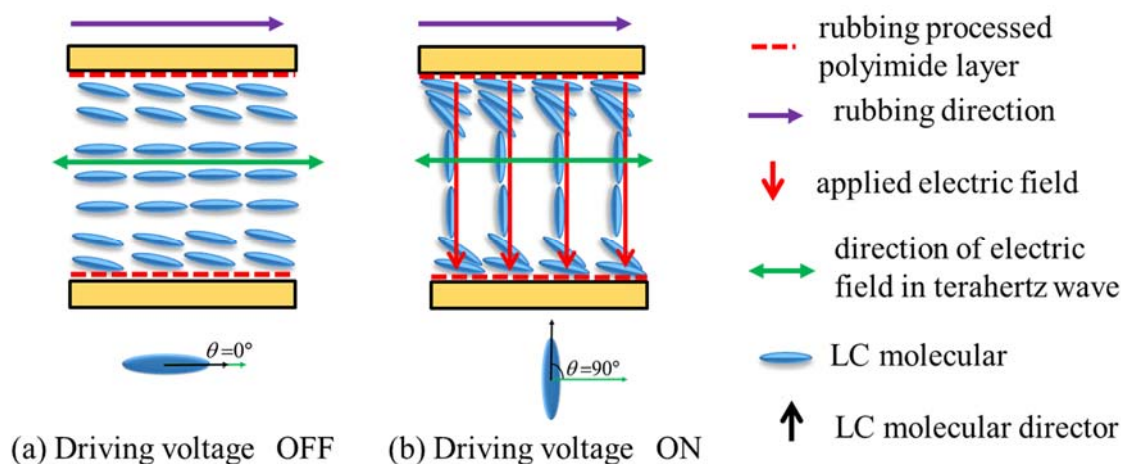


図 4.3 位相変化の原理

ネマティック液晶分子のダイレクタ方向とテラヘルツ波の電界方向のなす角を θ とする。図 4.3(a)に示すように液晶素子に駆動電圧が印加されない場合、液晶分子は素子の上部基板と下部基板の基板表面に施されたポリイミド配向膜の配向規制力の影響を受けるため、ラビング方向に沿って配向する。このとき、液晶分子のダイレクタ方向はテラヘルツ波の電界方向と平行になり、なす角は 0° となり、位相は式 $\varphi(0) = \frac{2\pi fl}{c} \sqrt{\varepsilon(0)}$ により計算される。ここで $\varphi(0)$ は駆動電圧が印加されないときのテラヘルツ波の位相、 f はテラヘルツ波の周波数、 l はNRDガイドのネマティック液晶層の長さ、 c は光速、 $\varepsilon(0)$ はネマティック液晶の分子長軸方向の誘電率である。

一方、図 4.3(b)に示すように、液晶素子に駆動電圧が印加される場合では、上部基板と下部基板の間に電圧が印加されており、液晶は印加電界に配向させる力が働くため、液晶分子はこれに沿って再配向する。この際、液晶分子全体のダイレクタ方向はテラヘルツ波の電界方向とほぼ垂直になり、なす角は 90° となる。ネマティック液晶の誘電率は $\varepsilon(V)$ に変化し、液晶の短軸方向の誘電率 ε_{\perp} とほぼ等しくなる($\varepsilon(V) \approx \varepsilon_{\perp}$)。この際、 $\varphi(V)$ を駆動電圧が印加されたときのテラヘルツ波の位相とすると式 $\varphi(V) = \frac{2\pi fl}{c} \sqrt{\varepsilon(V)}$ により計算される。駆動電圧が印加されないときのテラヘルツ波の位相と駆動電圧が印加されるとき

ヘルツ波の位相の差を位相変化量と言い、式(4.1)で計算される。

$$\begin{aligned}\Delta\varphi = \varphi(V) - \varphi(0) &= \frac{2\pi fl}{c} \left[\sqrt{\varepsilon(V)} - \sqrt{\varepsilon(0)} \right] \\ &= \frac{2\pi fl}{c} \Delta n\end{aligned}\quad (4.1)$$

ここで、 $\Delta\varphi$ は位相変化量、 Δn は複屈折である。

4.3 基本NRDガイド

4.3.1 NRDガイドの概要

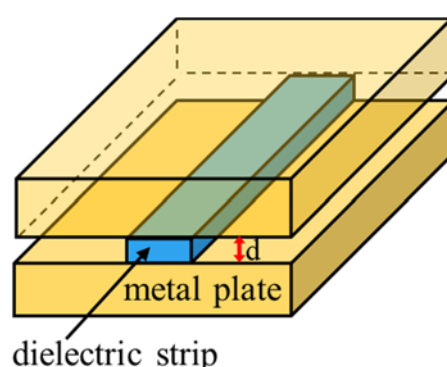


図 4.4 NRDガイドの基本的構造

第2章で述べたマイクロ波ミリ波移相器であるコプレーナ線路型とMSL型は伝送線路型のデバイスである。一方、NRDガイドは伝送線路型のデバイスではなく誘電体線路の一種であり、高周波領域において伝送線路と比べて格段に低損失である。また、一般の誘電体線路と比べ、NRDガイドは線路の曲がりや不連続部分では不要な放射波が発生しないという特徴がある。この特徴から、「非放射的誘電体線路」と呼ばれ、その英訳である Non-Radiative Dielectric waveguide の頭文字をとり、NRDガイドと呼ばれている[90]。NRDガイドは1988年に米山等により報告され、以後研究が行われている[91]。NRDガイドの構造は図4.4に示すように、基本的に2枚の金属板間隔 d に誘電体を挟んだ構造である。金属板の間に誘電体を挟んだ事により電波が存在できる部分とできない部分を作り出すことができ、当初は主に60GHz周波数帯で使用されてきた。

一般に図4.5に示すように、2枚の平行平板金属板に誘電体を挟み込んだ構造の伝送路の動作モードはTEモード(Transverse Electric Mode)、LSEモード(Longitudinal Sectional Electric Mode)およびLSMモード(Longitudinal Sectional Magnetic Mode)の3種類がある。それぞれを図4.5(a)、4.5(b)、4.5(c)に示す。

図4.5(a)に示すTEモードでは、電界は導体板に垂直であるので非放射性的の特

性を有せず、誘電体端面から放射するため、NRD ガイドの動作モードにならない。また、図 4. 5(b)に示す LSE モードでは、非放射性的特性をもつが、低損失の条件である電界が導体板に平行を満たさないため NRD ガイドの動作モードにならない。一方、図 4. 5(c)に示す LSM モードでは、電界が導体板に対し水平であるため、低損失の条件を満たし NRD ガイドの動作モードして機能する[92]。

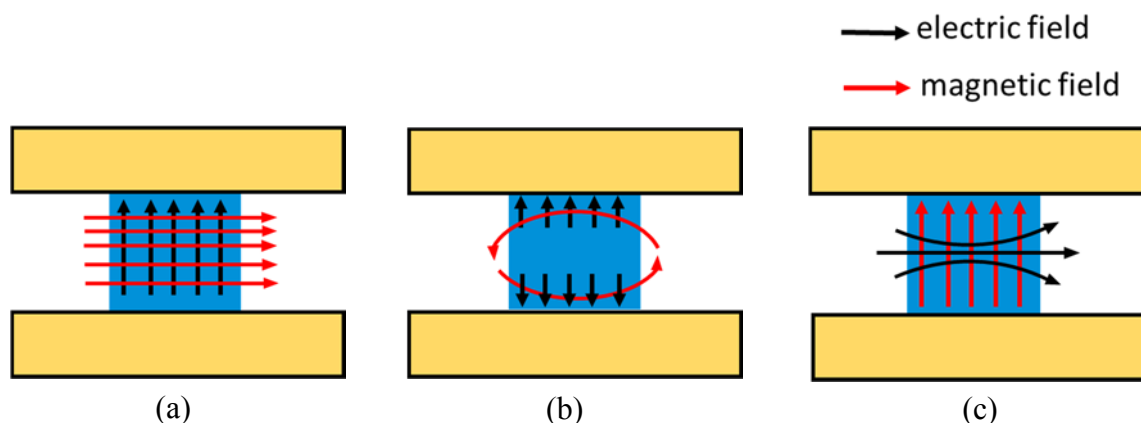


図 4. 5 NRD ガイドモードの電磁界分布
(a) TE モード、(b) LSE モード、(c) LSM モード

4.3.2 動作原理

一般に、2枚の金属板の間に伝搬させる電磁波の波長 λ と金属板間の間隔 d が関係式

$$d < \frac{\lambda}{2} \quad (4.2)$$

を満たす場合、遮断効果により電磁波は金属板間に存在できない。

また、この2枚の金属板間に誘電率 ϵ_r の誘電体を挿入し、同じ電磁波を伝搬させた場合では、誘電体を通る電磁波の波長 λ_{ϵ_r} は、誘電体の波長短縮効果により、

$$\lambda_{\epsilon_r} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \lambda \quad (4.3)$$

で表すことができる。自由空間を伝搬する電磁波の波長と誘電体中を伝搬する電磁波の波長の関係は

$$\lambda_{\epsilon_r} < \lambda \quad (4.4)$$

となる。このとき、デバイスに伝搬させる電磁波の半波長と金属板間隔 d は

$$d < \frac{\lambda_{\epsilon_r}}{2} \quad (4.5)$$

であった場合、電磁波は誘電体部分にも伝搬しない。したがって、自由空間中を伝搬する電磁波の波長と誘電体中を伝搬する電磁波の波長が以下の関係を満たす場合、

$$\frac{\lambda_{\epsilon_r}}{2} < d < \frac{\lambda}{2} \quad (4.6)$$

自由空間中は電磁波を遮断し、誘電体中のみ伝搬する。これがNRDガイドの原理である。

図 4.6 に NRD ガイドとして動作する周波数と金属板間の距離の関係を示す。縦軸はデバイスを伝搬させる電磁波の半波長を示し、横軸は電磁波の周波数を示す。この図では、誘電体の誘電率を 3.1 としている。図 4.6 から、NRD ガイドとして機能する範囲は黒い線と赤い断線に囲まれる部分であることがわかる。たとえば、400 GHz の周波数において、2 枚の金属板間隔 d 、すなわち誘電体部分の厚さは 375 μm 以上であると、誘電体中と自由空間中の両方ともに電磁波が伝搬するため、NRD ガイドして機能しない。また、誘電体部分の厚さは 212 μm 以下であると自由空間はもちろん、誘電体中も電磁波は存在できない。よって、NRD ガイドとして機能するためには誘電体部分の厚さは 213 μm ~ 375 μm でなければならない。

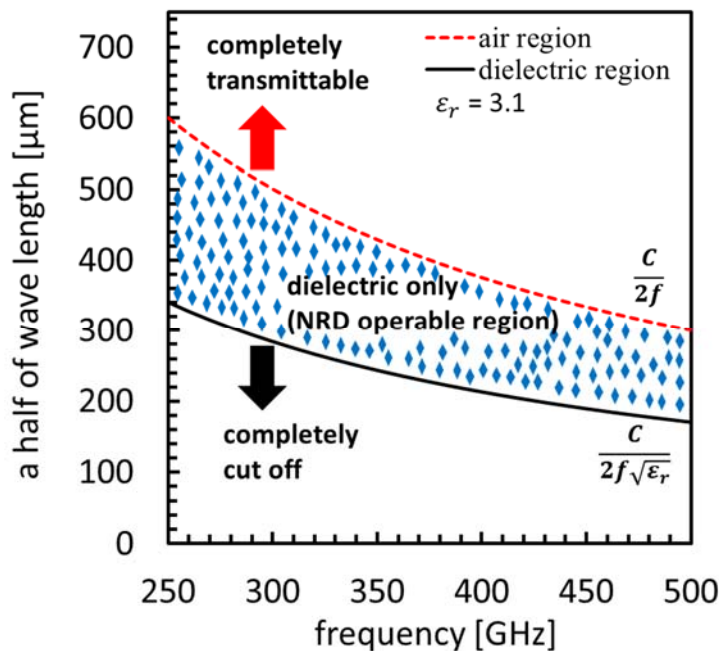


図 4.6 NRD ガイドの動作原理

4.4 液晶装荷NRDガイド型テラヘルツ波移相器の構造

4.4.1 液晶装荷NRDガイド型テラヘルツ波移相器

ネマティック液晶装荷NRDガイド型テラヘルツ波移相器の構造を図 4.7 に示す。基本的に本来のNRDガイドの固体誘電体部分の代わりに液晶を使用して置き換えた構造となっている。ネマティック液晶は液体と同様に流動性を持つことから液晶単体でのネマティック液晶装荷NRDガイド型テラヘルツ波移相器を

作製するのは困難である。そのため、あらかじめ金属基板を使用し、液晶層厚 $350\ \mu\text{m}$ ネマティック液晶装荷金属平行平板セルを作製する。この液晶金属平行平板セルの構造および作製方法はネマティック液晶 ITO ガラス平行平板セルと同様である。その後、表面に溝が施された金属板に挟み込み、完成させる。詳細の設計は図 4.7 に記載する。また、ネマティック液晶装荷 NRD ガイドに直接に金属板に駆動電圧を印加するため、本液晶装荷 NRD ガイドが移相器として機能するためには図 4.7(a) に示したように、液晶分子を座標の x 軸に配向させる必要がある。理由としては、液晶分子がこのように配列することで、駆動電圧印加前にテラヘルツ波の電界方向は液晶分子長軸方向と平行となり、異常光

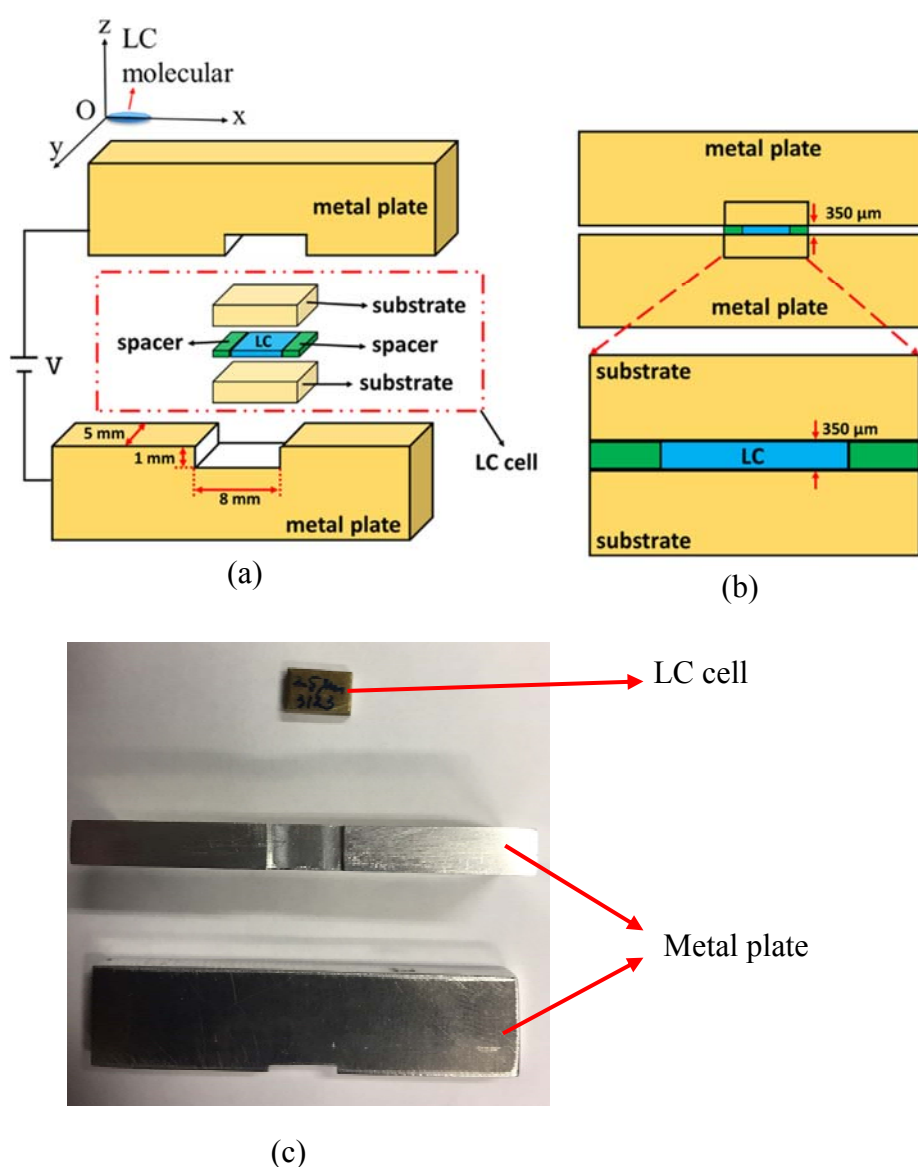


図 4.7 液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の構造
(a)概要図、(b)断面図、(c)実際に作製したデバイス

屈折率を感じる。一方、駆動電圧印加するとテラヘルツ波の電界方向は液晶分子長軸方向と垂直し、常光屈折率を感じる。そのため、駆動電圧の印加前後でテラヘルツ波が感じる屈折率が変化し、テラヘルツ波の位相が変化することで移相器として機能する。

4.4.2 液晶装荷 PET フィルム挿入した NRD ガイド型テラヘルツ波移相器

ネマティック液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器は NRD ガイドとして動作できるように、2 枚金属板の間隔を適切な範囲を保つ必要がある、すなわち誘電体部分の厚さを適切な範囲を保つことは重要である。そのため、液晶層厚を減少するために、液晶金属平行平板セルの液晶層と金属基板の間に PET フィルムを挿入することを提案した。基本的に、液晶装荷 PET フィルム挿入した NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の構造は液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の構造と同様である。PET フィルムの厚さは $125\ \mu\text{m}$ であり、液晶層厚は $100\ \mu\text{m}$ および $25\ \mu\text{m}$ を作製した。詳細の設計は図 4.8 に記載する。

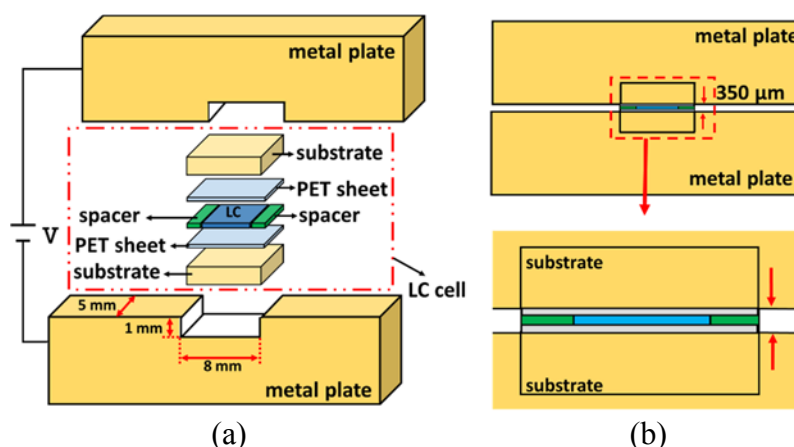


図 4.8 液晶装荷 PET フィルム挿入した NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の構造 (a)概要図、(b)断面図

4.5 テラヘルツ波測定系

4.5.1 測定装置の構成

本研究では、図 4.9 に示す VDI 社製のテラヘルツ波測定装置 (Virginia Diodes Inc., WR2.8(X2) Tx/Tr System) を使用した。アンテナの部分の拡大写真を右側に示す。測定モードとしては連続波(CW)および周波数掃引(SWEEP)を行うことが可能である。出力周波数に関して、最低周波数は $260\ \text{GHz}$ であり、最高周波数は $400\ \text{GHz}$ である。各測定モードおよび周波数がコンピューターにより制御される。測定時、被測定デバイスは送信アンテナと受信アンテナの間に置かれ、

測定結果は出力端子より電圧信号として出力され、オシロスコープに直接表示される。このとき、位相変化は 10 mV の電圧変化が 1 度に相当し、損失は 30 mV の電圧変化が 1 dB に相当する。

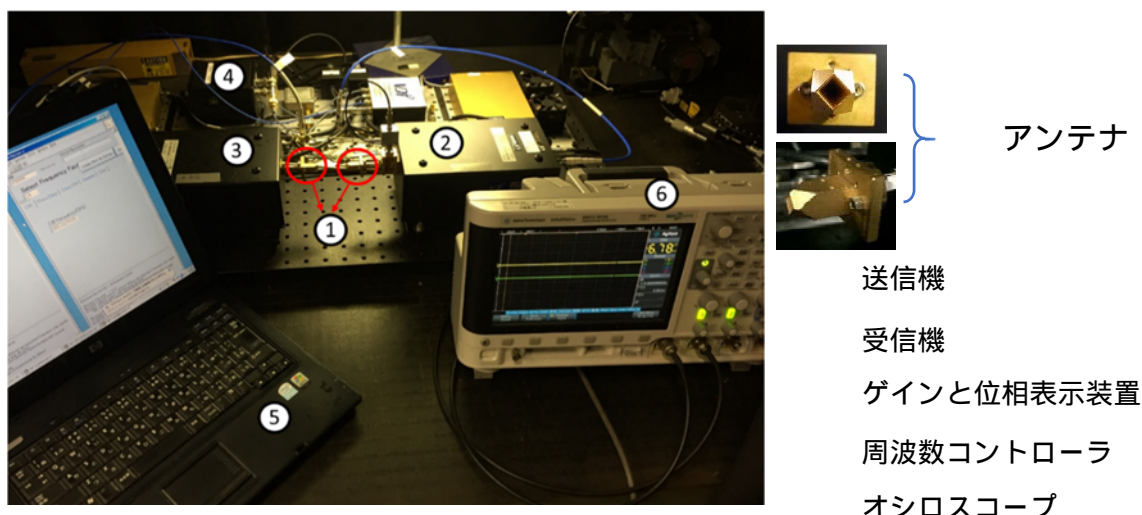


図 4.9 テラヘルツ波測定装置の構成

4.5.2 テラヘルツ波測定系

本研究で使用した測定装置をブロック図に表したものを図 4.10 に示す。ネマティック液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器に駆動電圧を印加するためにファンクションジェネレータ (Sony Techtronix, AFG310) および増幅器 (NE, S4010) が使用される。また、テラヘルツ波の伝搬損失および位相変化を測定するためにオシロスコープ (Aligent Technologies, DSO - X 3014) が接続される。まず、送信器のシンセサイザーで発生させたマイクロ波を周波数逡倍器で 24 倍に増幅することでテラヘルツ波を発生させる。発生したテラヘルツ波は送信アンテナと受信アンテナの間に置かれるネマティック液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器を透過し、受信機で受信される。測定原理として二つシンセサイザーで周波数 282.5 MHz の差分信号を作り出すことにより、受信された電磁波はテラヘルツ波と中間周波数 282.5 MHz が含まれる。本装置ではテラヘルツ波の検出はスーパーヘテロダイン方式を用いており、受信されたテラヘルツ波を中間周波数信号に変換される。この中間周波数信号は 282.5 MHz フィルターにより、差分信号のみがベクトルボルトメーターに入力される。一方、送信前の信号も同様に、ベクトルボルトメーターに入力されるため、送信前と受信後の信号を比較することにより、テラヘルツ波の損失と位相変化を測定することができる。このように、ネマティック液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器に駆動電圧を印加・除去し、液晶の誘電率変化によりテラヘルツ波の伝送特性の変化を測定した。

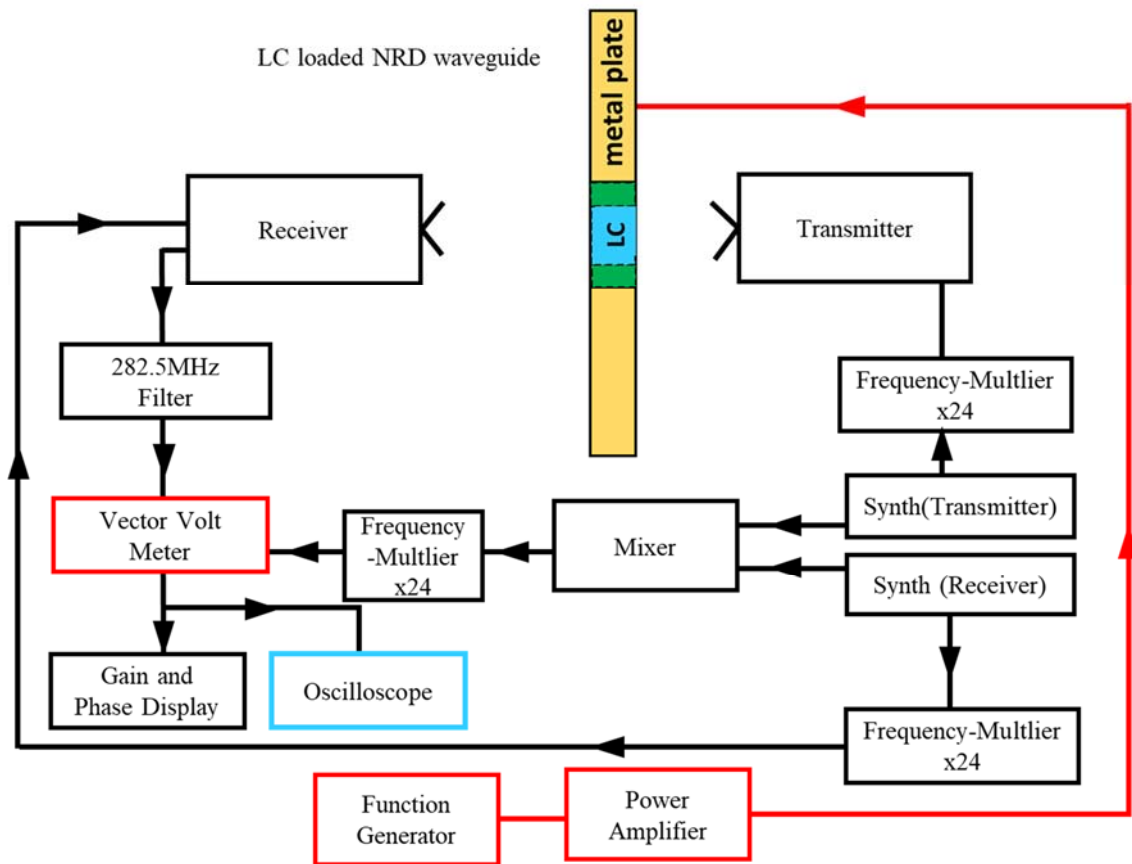


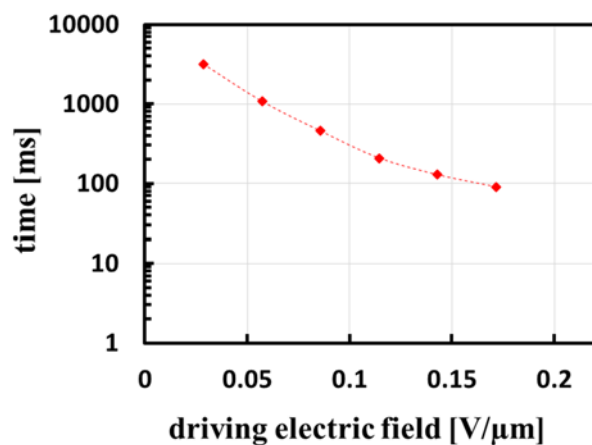
図 4.10 テラヘルツ波測定系

4.6 ネマティック液晶 5CB 装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の測定結果

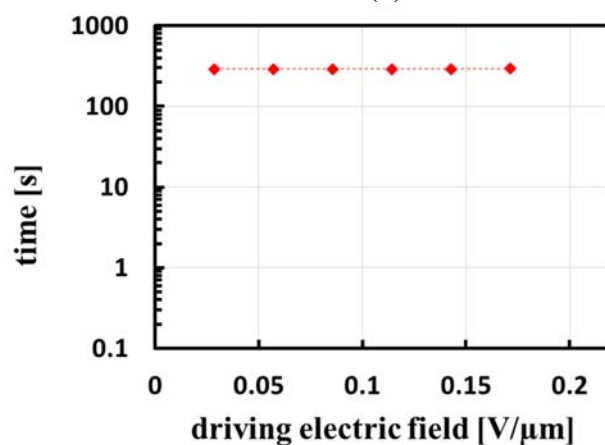
4.6.1 350 μm 液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の測定結果

液晶層厚 350 μm のネマティック液晶 5CB を NRD ガイド型テラヘルツ波移相器に装荷し（以下、350 μm 5CB-NRD）、テラヘルツ波測定系を用い、350 GHz の周波数でデバイスの応答特性を測定した。その測定結果を図 4.11 に示す。図 4.11(a) に示すように、立ち上がり応答時間は駆動電界に依存し、駆動電界を増加させると減少することがわかった。また、0.17 V/μm の駆動電界で約 90 ms である。次に、図 4.11(b) に示すように、立ち下がり応答時間は駆動電界に依存せず、ほぼ一定であり、約 292 s である。最後に、位相変化量を図 4.11(c) に示す。0.03 V/μm の駆動電界では位相変化量が 310° であるが、駆動電界が 0.05 V/μm より高くなると位相変化量はほぼ一定で約 314° であることがわかる。この測定結果から液晶層厚 350 μm ネマティック液晶 5CB 装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器を用いることにより、100 ms 以下の短い立ち上がり応答時間および約 314° の大きな位相変化量のテラヘルツ波移相器が得られたが、その反面、立ち

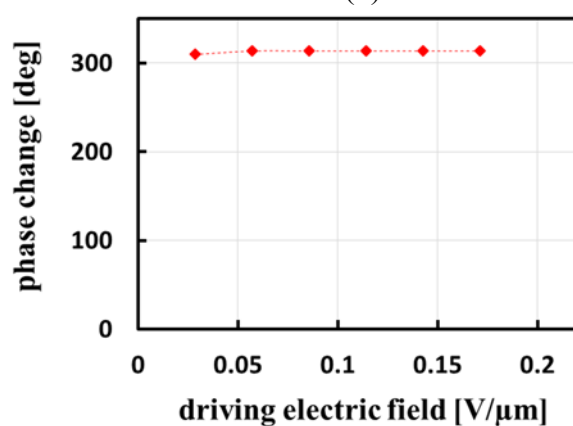
下がり応答時間は292 sであり、非常に長いことがわかった。このような移相器は実際の電子デバイスには応用不可能であると考えられる。



(a)



(b)



(c)

図 4.11 350 μmネマティック液晶装荷NRDガイド型テラヘルツ波移相器の測定結果 (a)立ち上がり応答時間、(b)立ち下がり応答時間、(c)位相変化量

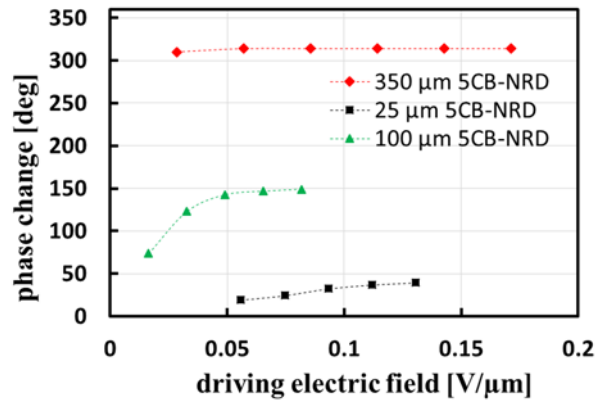
4.6.2 100 μm および 25 μm 液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の測定結果

計算式 $\tau_{decay} = \frac{\eta d^2}{K\pi^2}$ に示すように、立ち下がり応答時間は液晶層厚の2乗に比例するため、液晶層厚を薄くすることにより、立ち下がり応答時間は急激に減少し、より短い応答が得られると考えられる。しかしながら、ネマティック液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器は NRD ガイドとして動作できるように、誘電体の厚さを一定の範囲内を保つ必要がある。そのため、本節では、図 4.8 に示すように、ネマティック液晶金属セル部分において、厚さ 125 μm の PET フィルムの2枚を用い、金属基板と液晶層の間に挟み込むことにより液晶層厚を 100 μm と 25 μm (誘電体厚はそれぞれ 350 μm と 275 μm) のデバイスを作製し (以下、100 μm 5CB-NRD と 25 μm 5CB-NRD) それぞれの応答特性を測定した。測定結果を図 4.12 に示す。さらに、25 μm および 100 μm ネマティック液晶 5CB 装荷 ITO ガラス平行平板セルもあわせて示している (以下、25 μm 5CB-ITO と 100 μm 5CB-ITO)。まず、位相変化量に関して図 4.12(a)に示すように、液晶層厚が減少することにより位相変化量が減少することがわかる。具体的には 350 μm 5CB-NRD の位相変化量は約 314°であるが、100 μm 5CB-NRD の位相変化量が約 150°であり、25 μm 5CB-NRD の位相変化量は約 39.5°である。ここで、式(4.1)に示したように、位相変化量は NRD ガイド型テラヘルツ波移相器のネマティック液晶層の長さおよびネマティック液晶の複屈折に依存するため、その長さを延長させるあるいはより高い複屈折を有するネマティック液晶を使用することでより大きい位相変化量を得ることは可能であると考えられる。

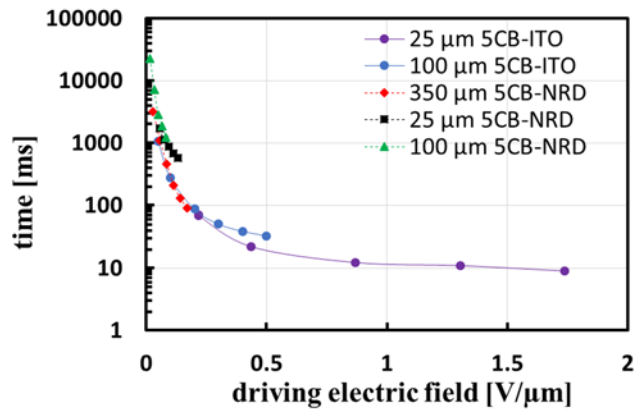
図 4.12(b)に立ち上がり応答時間を示す。すべてのデバイスにおいて、駆動電界は増加すると立ち上がり応答時間が減少することがわかる。また、デバイスの種類によらず、電界依存性はほぼ等しく、0.5 V/ μm の電界で立ち上がり応答時間は約 30 ms である。一方、図 4.12(c)に示すように、立ち下がり応答時間は駆動電界およびデバイスの種類に依存しないことがわかる。すべてのデバイスにおいて液晶層厚が等しいであると立ち下がり応答時間はほぼ等しい。具体的には 100 μm 5CB-ITO の立ち下がり応答時間が約 25 s であるに対して 100 μm 5CB-NRD の立ち下がり応答時間が約 22.2 s である。また 25 μm 5CB-ITO の立ち下がり応答時間が約 1.6 s であるに対して 25 μm 5CB-NRD の立ち下がり応答時間が約 1.4 s である。また、立ち下がり応答時間は液晶層厚の2乗に比例することも確認できた。具体的に、25 μm 5CB-NRD の立ち下がり応答時間が約 1.4 s であるに対して 100 μm 5CB-NRD の立ち下がり応答時間が約 22.2 s であり、350 μm 5CB-NRD の立ち下がり応答時間が約 292 s であった。よって、ネマティック液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器に PET フィルムを挿入するこ

とにより、液晶層厚を減少することをでき、立ち下がり応答時間を 1 秒オーダーに短縮することが実現できた。

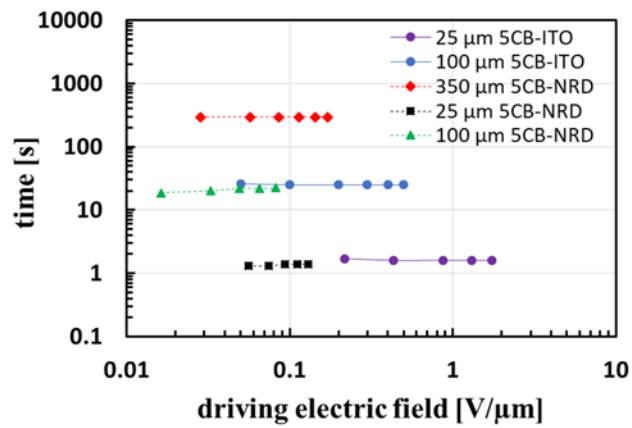
スタティックなデバイスを実現するために、大きい位相変化量かつ短い応答時間の特性を有するネマティック液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器が必要である。以上の測定結果より、ネマティック液晶 5CB 装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の立ち上がり応答時間は 1 s 程度であったが、立ち下がり応答時間に関しては、液晶層厚を 25 μm に減少すると約 1.4 s であり、より改善することが望ましいと考えられる。一方、位相変化量に関して、液晶層厚が 350 μm である場合では約 314° であり、実際のデバイスに十分に応用可能であると考えられるが、液晶層厚を 25 μm に減少させると約 39.5° に減少してしまう。本研究で用いた液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の誘電体線路長は 5 mm であるため、実用化する際に、応答時間が 1 s 程度で位相変化量が 360° の移相器を実現するためには誘電体線路長を約 9 倍に延長する、すなわち約 45 mm に延長する必要がある。この長さはやや長いので、本液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器を実際のデバイスに応用するには位相変化量および応答時間の両方ともより改善する方法の検討が必要であると考えられる。



(a)



(b)



(c)

図 4.12 ネマティック液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器および ITO 平行平板セルの測定結果 (a)位相変化量、(b)立ち上がり応答時間、(c)立ち下がり応答時間

4.7 まとめ

本章では、テラヘルツ波の概要および基本NRDガイドの構造について説明するとともに、その動作原理について述べた。次に、固体誘電体を用いた基本のNRDガイドの代わりにネマティック液晶を用いたネマティック液晶 5CB 装荷NRDガイド型テラヘルツ波移相器を提案し、テラヘルツ波測定系により液晶層厚 350 μm 、100 μm 、25 μm ネマティック液晶 5CB 装荷NRDガイド型テラヘルツ波移相器の応答特性を測定した。すべてのデバイスにおいて立ち上がり応答時間は駆動電界に依存し、駆動電界が大きくなると減少することが確認できた。また、立ち上がり応答時間はデバイスの種類に依存せずほぼ等しく、電界が0.5 V/ μm より大きい場合に約 30 ms であることがわかった。一方、立ち下がり応答時間は駆動電界とデバイスの種類に依存せずに液晶層厚の 2 乗に比例することが確認できた。液晶層厚 350 μm ネマティック液晶 5CB 装荷NRDガイド型テラヘルツ波移相器の立ち下がり応答時間は約 292 s であるが、液晶層厚を 25 μm に減少させると立ち下がり応答時間は約 1.4 s になり、約 208 分の 1 倍に短縮できた。しかしその反面、位相変化量が 314°から約 39.5°に減少することがわかった。この位相変化量を大きく得るために、ネマティック液晶装荷NRDガイド型テラヘルツ波移相器のガイド長を長くする、あるいはより高い複屈折を有するネマティック液晶が必要である。本移相器は実際の電子デバイスに応用するためには、位相変化量と応答時間の両方をより改善する必要があることがわかった。

第 5 章

二周波駆動およびナノファイバー複合体による 液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波 移相器の応答改善

5.1 はじめに

前章ではNRDガイド型テラヘルツ波移相器の動作原理および液晶単体を用いた移相器の動作特性について説明した。その中で、NRDガイドの誘電体層を全て液晶とした場合、液晶層の厚さは350 μm と厚くなるため、立ち下がり応答時間が292 sと非常に長いことがわかった。また、液晶層の上下をPET取扱とし、液晶層の厚さを減少させることにより、立ち下がり応答時間を短縮することができることを明らかにしたが、まだ十分とはいえない。そこで、本章では、まず二周波液晶および二周波駆動の改善方法について説明し、ネマティック液晶RDP-A4188を用いてNRDガイド型テラヘルツ波移相器およびITOガラス平行平板セルに装荷し、応答時間の改善を検討する。次に、ナノファイバーの作製および液晶/ナノファイバー複合体による応答改善原理について説明する。最後に、ネマティック液晶RDP-A3123/ナノファイバー複合体を用いて液晶装荷NRDガイド型テラヘルツ波移相器の応答改善について検討する。

5.2 二周波駆動液晶による応答時間の改善

5.2.1 二周波駆動液晶

サーモトロピック液晶の大部分は棒状分子からできることがよく知られている。棒状の形状をしている液晶分子は極性基の結合位置によって、分子全体の双極子モーメントの向きと大きさを調整することができる。液晶分子に駆動電圧を印加すると、液晶分子はその電界方向に揃うように再配向する。しかしながら、ある種類の液晶分子に対して、印加する駆動電圧の周波数を数ヘルツから数メガヘルツ(低い周波数から高い周波数)まで変化させると、以前電界方向に平行に配向していた液晶分子が、ある周波数の値に達すると垂直に配向するように

なる。このように液晶の誘電異方性が正から負に変化する現象を示す液晶材料を二周波液晶という。序論の液晶の概要で説明したように液晶相には液晶分子の配向様式の違いにより数種類に分類でき、その中でも最も配向秩序度の低いものはネマティック相である。ネマティック液晶は配向秩序度が小さいことから一般的に粘度が低く、電場に対する応答性が良いため、一般的にディスプレイや光シャッターなどのような光学デバイスの液晶材料として広く用いられている。そこで、このような低粘度で駆動電界に対して応答性がよく、駆動電圧の周波数に対する配向様式の違いを示すネマティック二周波液晶を用い、NRDガイドに装荷することで、各周波数において分子の配向変化に駆動力を付与することができるため、応答時間の改善が期待できる。

5.2.2 改善原理

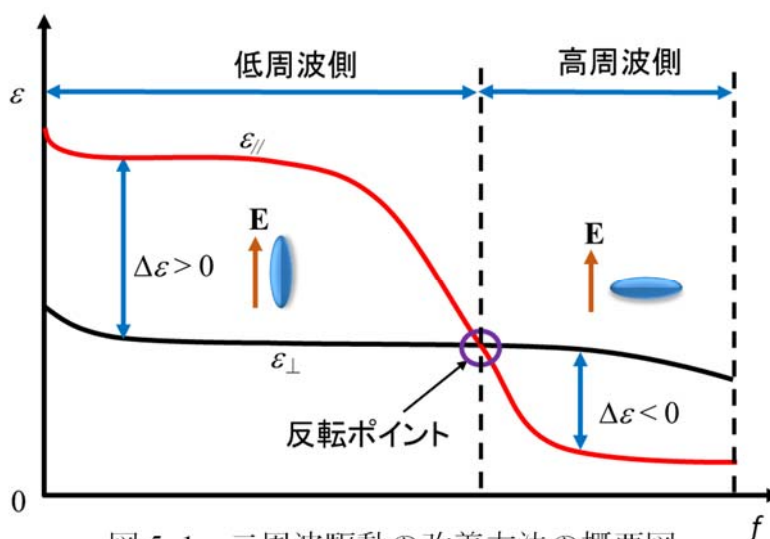


図 5.1 二周波駆動の改善方法の概要図

一般的に液晶に電界を印加した際、誘電異方性が正の場合は液晶は電界に配向させる力が働く。その力がアンカーリングによる規制力より大きくなった場合、液晶分子は電界方向に再配向する。この過程を立ち上がり応答といい、応答時間は比較的短い。一方、印加電界が除去すると電界の影響がなくなり、アンカーリングによる規制力の働きにより液晶分子は初期配向に戻る。これを立ち下がり応答といい、立ち下がり応答時間は式(5.1)により計算される。

$$\tau_d = \frac{\eta d^2}{\pi^2 k} \quad (5.1)$$

ここでは、 τ_d は立ち下がり応答時間であり、 d は液晶層厚、 η は粘度、 k は弾性定数である。立ち下がり応答過程において液晶分子は電界の影響を受けないため、電界を印加した際の立ち上がり応答時間と比べ非常に長い。そのため、積極的に電界を印加することで、初期の配向状態へ戻すことが出来ればより短い応答時間を得ることができる。二周波液晶の誘電異方性($\Delta\epsilon$)は低周波数帯において正であり、高周波数帯において負である。二周波液晶を用いるデバイスに駆動電界を印加し続けながら周波数を低周波数から高周波数に切り替えることで応答時間を改善するのは本改善方法の原理である。

5.2.3 各液晶の誘電率の周波数依存性

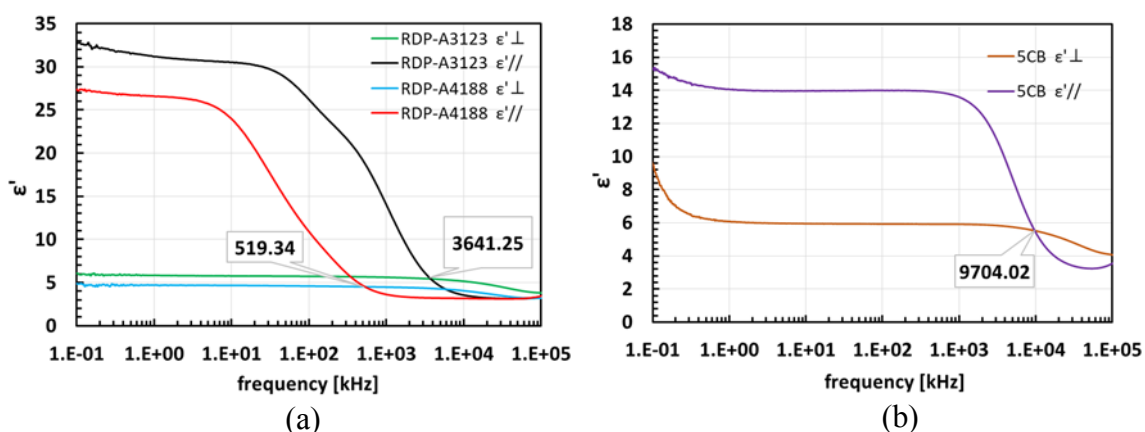


図 5.2 (a) RDP-A4188 ネマティック液晶と RDP-A3123 ネマティック液晶 および(b) 5CB ネマティック液晶の誘電率の周波数依存性

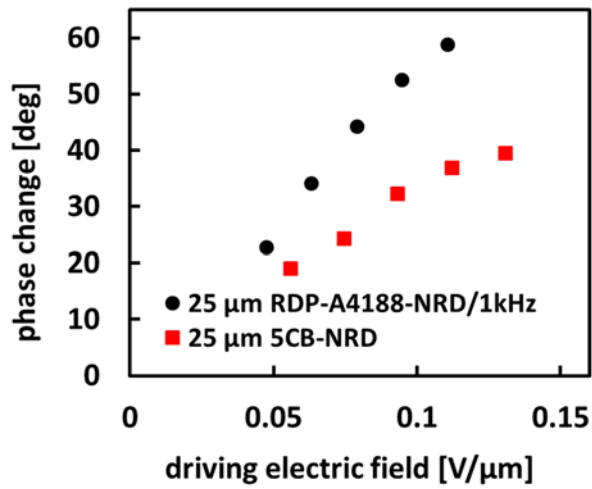
液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器に用いるネマティック液晶 RDP-A4188 (DIC)、ネマティック液晶 RDP-A3123 (DIC)および単体ネマティック液晶 5CB のそれぞれの誘電率周波数依存性特性を測定した。測定結果を図 5.2 に示す。図 5.2 (a)に示すようにネマティック液晶 RDP-A4188 においては約 520 kHz の周波数で誘電異方性の符号が変わるのに対して、ネマティック液晶 RDP-A3123 は約 3.64 MHz の周波数で誘電異方性の符号が変わる。また、図 5.2 (b)に示すように、ネマティック液晶 5CB は約 9.7 MHz の周波数で誘電率の符号が変わることがわかる。1 MHz のような高周波領域ではアンプにより高い電圧を出力することが困難であるので、ネマティック液晶 RDP-A3123 およびネマティッ

ク液晶 5CB は二周波液晶として扱いにくいと考えられる。そのためにネマティック液晶 RDP-A8188 の使用を検討した。

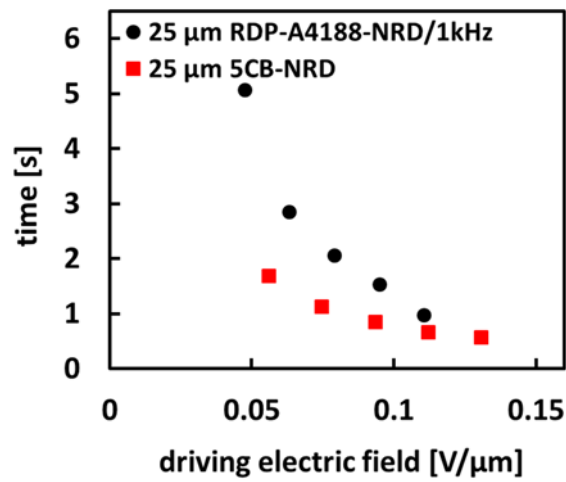
5.2.4 RDP-A4188 液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の測定結果

ネマティック液晶 RDP-A4188 を装荷した NRD ガイド型テラヘルツ波移相器 (以下、25 μm RDP-A4188-NRD/1kHz とする) の位相変化量、立ち上がり時間および立ち下がり応答時間の測定結果を図 5.3 に示す。このとき、液晶層厚は 25 μm である。この図には、ネマティック液晶 5CB 装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器 (以下、25 μm 5CB-NRD) の測定結果もあわせて示している。この測定結果により、25 μm RDP-A4188-NRD/1kHz の位相変化量は駆動電界の増加に伴って大きくなることを確認でき、0.1 V/ μm の駆動電界では約 60° であり、まだ増加する傾向がある。一方、25 μm 5CB-NRD の位相変化量は約 0.1 V/ μm の駆動電界で位相変化量がほぼ飽和している。また 25 μm RDP-A4188-NRD/1kHz の位相変化量の方が 25 μm 5CB-NRD より約 1.5 倍が大きくネマティック液晶 RDP-A4188 を用いることで大きい位相変化量が得られることがわかった。理由としてはネマティック液晶 RDP-A4188 の方が複屈折が大きいと考えられる。立ち上り応答時間は図 5.3(b) に示したように、駆動電界の増加に伴って短くなることを確認できた。駆動電界が低い場合では 25 μm RDP-A4188-NRD/1kHz の方が長い駆動電界が高くなるとほぼ 25 μm 5CB-NRD の立ち上がり応答時間と等しいことがわかった。主な原因としてはネマティック液晶 5CB において粘度定数は 24.6 mPa \cdot s (25°C) であるのに対してネマティック液晶 RDP-A4188 の粘度定数は 220.2 mPa \cdot s (20°C) であり、粘度が高いからであると考えられる。

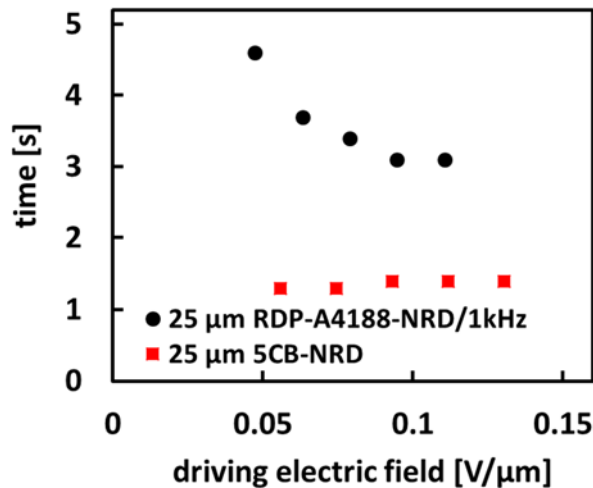
最後に、立ち下がり応答時間の結果を図 5.3(c) に示す。25 μm 5CB-NRD において立ち下がり応答時間は約 1.4 s であるに対して 25 μm RDP-A4188-NRD/1kHz の立ち下がり応答時間は約 3 s であり、約 2 倍長いことがわかった。ネマティック液晶 RDP-A4188 を用い、大きな位相変化量を維持しながら立ち下がり応答時間を減少するため、二周波駆動による駆動を検討する。



(a)



(b)



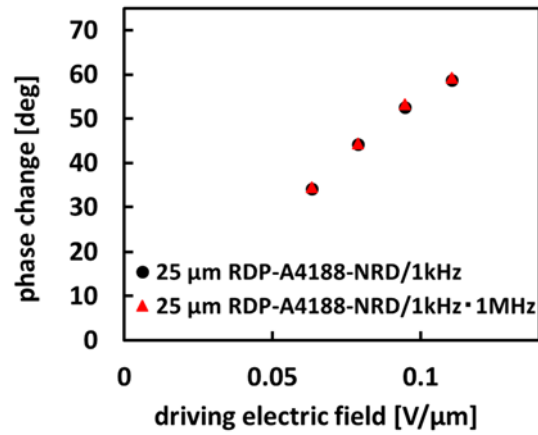
(c)

図 5.3 ネマティック液晶 RDP-A4188 装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の測定結果 (a) 位相変化量、(b) 立ち上がり応答時間、(c) 立ち下がり応答時間

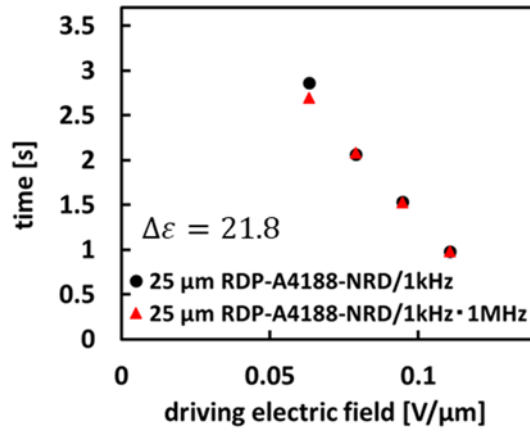
5.2.5 二周波駆動による RDP-A4188 液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の測定結果

駆動電界を液晶層厚 $25\ \mu\text{m}$ ネマティック液晶 RDP-A4188 装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器に印加し続け、周波数を $1\ \text{kHz}$ と $1\ \text{MHz}$ 切り替える際に移相器の応答特性を測定した。その測定結果を図 5.4 に示す。 $25\ \mu\text{m}$ RDP-A4188-NRD/1kHz の測定結果もあわせて示す。位相変化量については $1\ \text{kHz}$ - $1\ \text{MHz}$ の二周波駆動を用いて移相器を駆動したとき（以下、 $25\ \mu\text{m}$ RDP-A4188-NRD/1kHz \cdot 1MHz とする）と $25\ \mu\text{m}$ RDP-A4188-NRD/1kHz は図 5.4(a)に示したように等しいことがわかった。これにより、二周波駆動方法は位相変化量に影響を与えず、位相変化量を保つことができることが確認できた。また、図 5.4(b)に示すように $25\ \mu\text{m}$ RDP-A4188-NRD/1kHz \cdot 1MHz と $25\ \mu\text{m}$ RDP-A4188-NRD/1kHz の立ち上がり応答時間は等しく、 $0.1\ \text{V}/\mu\text{m}$ の駆動電界より高い電界で $1\ \text{s}$ 以下であることがわかる。一方、図 5.4(c)に示すように、駆動電界が低い場合では $25\ \mu\text{m}$ RDP-A4188-NRD/1kHz \cdot 1MHz と $25\ \mu\text{m}$ RDP-A4188-NRD/1kHz の立ち下がり応答時間はほぼ等しく、約 $3\ \text{s}$ であることがわかる。これは、駆動電界によるトルクよりもラビングによる配向規制力の方が強いことを示唆している。一方、駆動電界が $0.08\ \text{V}/\mu\text{m}$ より高くなると $25\ \mu\text{m}$ RDP-A4188-NRD/1kHz \cdot 1MHz の立ち下がり応答時間の方が短くなり、応答改善がみられる。しかし、その改善度はまだ低く、立ち下がり応答時間は $2\ \text{s}$ より長いことがわかった。

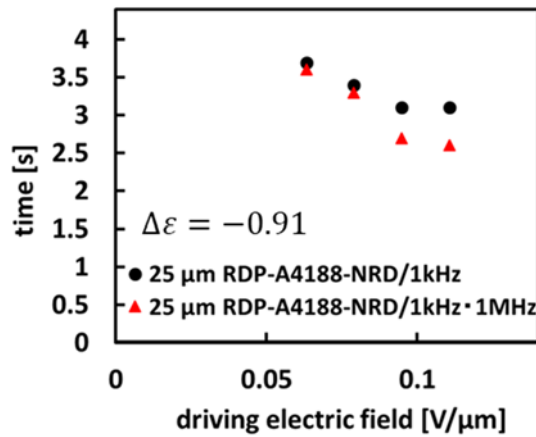
より高い駆動電界で測定し、二周波駆動方法による応答改善効果を検討するのは望ましいですが、本研究において使用した測定系では、パワーアンプの出力に限界があり、 $1\ \text{MHz}$ の周波数では最大 $70\ \text{V}$ までしか出力することができず、ネマティック液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器に十分な電界を印加することができず、二周波駆動の効果を十分に発揮できなかつたと考えられる。これを明らかにするため、同じ液晶層厚 $25\ \mu\text{m}$ ネマティック液晶 RDP-A4188 を用い、ITO ガラス平行平板セルに注入し、 $1\ \text{kHz}$ - $1\ \text{MHz}$ の二周波駆動の改善効果を確認した。その測定結果を図 5.5 に示す。



(a)



(b)



(c)

図 5.4 二周波駆動によるネマティック液晶 RDP-A4188 装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の測定結果
 (a) 位相変化量、(b) 立ち上がり応答時間、(c) 立ち下がり応答時間

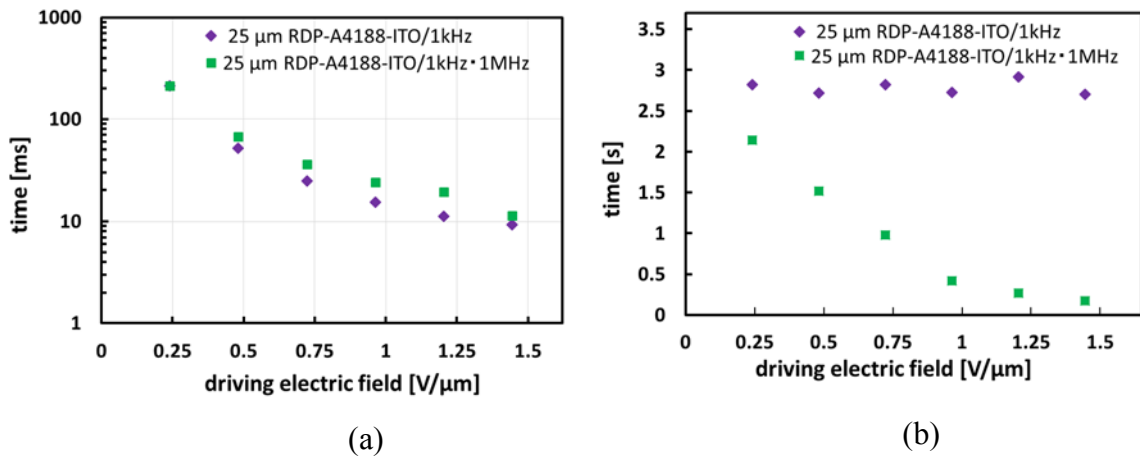


図 5.5 二周波駆動によるネマティック液晶 ITO ガラス平行平板セルの測定結果 (a) 立ち上がり応答時間および (b) 立ち下がり応答時間

図 5.5(a)に示すように 1 kHz-1 MHz の二周波駆動を用いて ITO ガラス平行平板セルを駆動したとき (25 μm RDP-A4188-ITO/1kHz · 1MHz) の立ち上がり応答時間は 1 kHz の周波数で駆動したとき (25 μm RDP-A4188-ITO/1kHz) と等しいことがわかる。一方、図 5.5(b)に示すように 25 μm RDP-A4188-ITO/1kHz の立ち下がり応答時間は駆動電界に依存せずほぼ一定であり約 2.8 s である。これに対して 25 μm RDP-A4188-ITO/1kHz · 1MHz の立ち下がり応答時間は駆動電界の増加に伴って減少することがわかった。また駆動電界は 1.25 V/μm より高くなると立ち下がり応答時間は 0.2 s 以下となることがわかった。本測定結果から、二周波駆動の改善方法を用いることにより液晶層厚 25 μm ネマティック液晶 RDP-A4188 装荷 ITO ガラス平行平板セルにおいて立ち上がり応答時間に影響を与えずに、立ち下がり応答時間を約 1/14 倍に短縮でき、二周波駆動の改善方法の効果を明らかにした。ここでネマティック液晶 RDP-A4188 装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の測定結果とネマティック液晶 RDP-A4188 装荷 ITO ガラス平行平板セルの測定結果を同じ図に示すと図 5.6 のようになる。ネマティック液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の測定結果は図 5.6 の青い楕円形に囲まれた領域である。液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の立ち上がり応答時間は駆動電界に依存し、減少し続けており、液晶装荷 ITO ガラス平行平板セルの立ち上がり応答時間と同じ傾向を示す。また、立ち下がり応答時間も同様の結果を示している。ここで、それぞれのデバイスにおいて液晶

層にかかった電界を比較すると、液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の方が低いことは明らかである。したがって、液晶装荷 ITO ガラス平行平板セルの液晶層にかかった電界の同程度の電界を液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器に印加することでできれば、液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器においても液晶装荷 ITO ガラス平行平板セルと同様の改善を得る可能性があると考えられる。

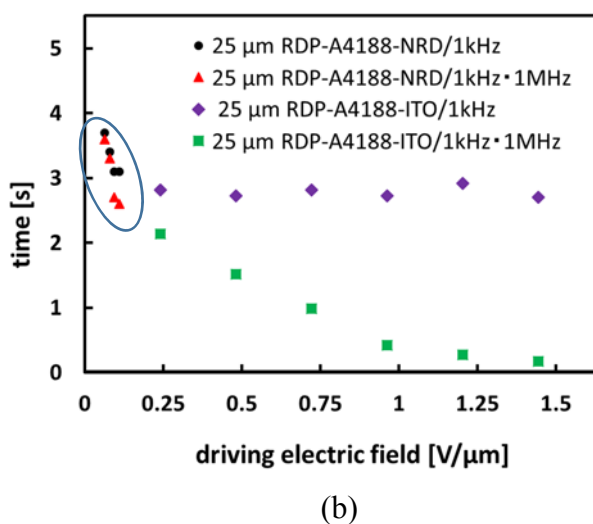
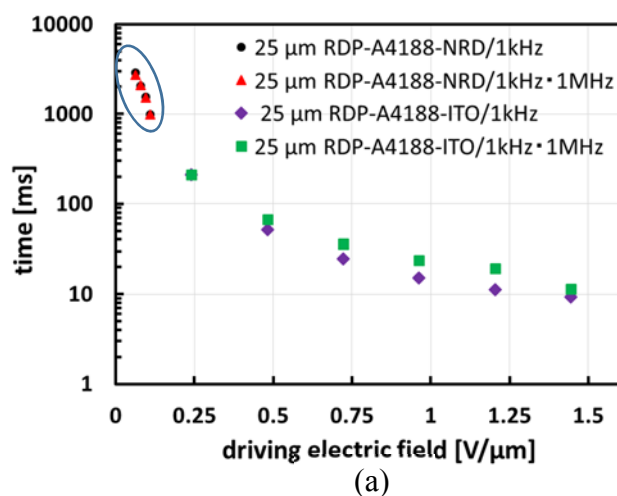


図 5.6 二周波駆動によるネマティック液晶装荷 NRD ガイド型移相器および ITO ガラス平行平板セルの測定結果(a) 立ち上がり応答時間、(b) 立ち下がり応答時間

一方、二周波駆動の改善方法においては立ち上がり応答時間と立ち下がり応答時間の両方とも立ち上がり応答時間の計算式(5.2)に依存する。

$$\tau_r = \frac{\eta}{\varepsilon_0 \Delta\varepsilon (E^2 - E_c^2)} \quad (5.2)$$

図 5.2(a)で示した各液晶の誘電率の周波数依存性において、ネマティック液晶 RDP-A4188 では、1 kHz の周波数の誘電異方性 $\Delta\varepsilon$ は約 21.8 であり、1 MHz の周波数の誘電異方性 $\Delta\varepsilon$ は約 0.91 である。二周波駆動の改善方法を用いる場合には立ち下がり応答時間は立ち上がり応答時間と比べ、式 5.2 の $\Delta\varepsilon$ の大きさの違いにより、約 24 倍長いことがわかる。より短い立ち下がり応答時間を得る、すなわち立ち上がり応答過程と同じ速さの立ち下がり応答過程が得られるためには、1 kHz の周波数での誘電異方性と 1 MHz の周波数での誘電異方性が等しいネマティック液晶が必要であると考えられる。

以上より、液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器において二周波駆動の改善方法は有効であることを確認ができた。また、この改善方法の効果を十分に発揮するためには、液晶材料の選定が必要であることがわかった。

5.3 液晶/ナノファイバー複合体による応答時間の改善原理

5.3.1 まえがき

マイクロ波ミリ波移相器の応答時間改善を考察する際にも説明したように、液晶を高周波デバイスに应用する際には、デバイスの液晶層の厚さが数十 μm から数百 μm となるため、電圧を除去した際の液晶の立ち下り応答時間が非常に長く、数十秒以上となり、应用上大きな課題となる。実際にネマティック液晶 5CB 装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の測定結果も明らかにしたように、液晶層厚 100 μm では立ち下がり応答時間は約 22 sであった。これは液晶層が厚いデバイスの一般的な問題である。この問題を解決するため、高分子安定化ネマティック液晶の利用などの研究が行われているが、不透明な金属基板で構成された液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器では紫外線照射による高分子ネットワークを形成させることが不可能である。よって、この改善方法は適切ではないと考えられる。

一方、ナノファイバーは直径が数 nm から 1000 nm までの高分子繊維であり、生物医学分野[93-95]からエネルギー関連のデバイスまで幅広く应用され、電子デバイスの分野でも注目を浴びている[96-98]。ナノファイバーは直径が非常に小さいため、液晶分子との相互作用が期待される。ナノファイバーは PSNLC で

形成される高分子鎖と比べると直径が太く、形成する高分子材料を選択することにより液晶との相互作用の強さを制御することも期待できる。そこで本節では、ナノファイバーと液晶の相互作用を利用したネマティック液晶/ナノファイバー複合体によるネマティック液晶装荷NRDガイド型テラヘルツ波移相器の時間応答改善を目的とし、ナノファイバーを形成する素材として Polyacrylonitrile (PAN)を取り上げ、ネマティック液晶/ナノファイバー複合体装荷NRDガイド型テラヘルツ波移相器の応答特性などについて検討を行う。

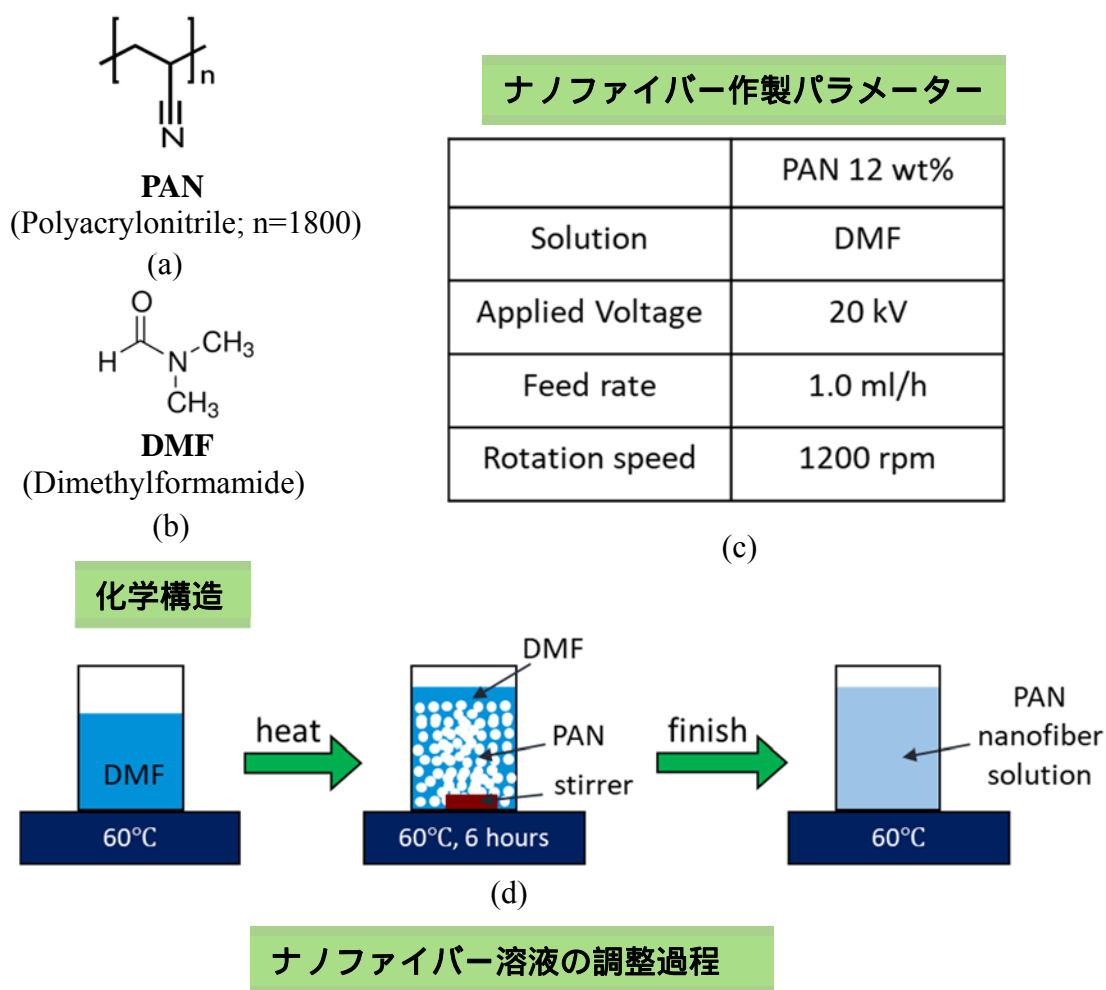


図 5.7 試料の化学構造、ナノファイバー作製パラメーターおよびナノファイバー溶液の調整過程

5.3.2 ナノファイバーの作製

ナノファイバーを形成させるために、本研究では高分子材料としてポリアクリロニトリル (Polyacrylonitrile: PAN) を使用した。PAN は一般的に繊維や合成

ゴムの原料などに使用されている有機高分子の一種で、特徴として耐薬品性、保香性、薬品性分の低吸着性等がある。化学構造式は図 5. 7(a)である。この PAN を溶液として扱うために、溶媒として、ジメチルホルムアミド (Dimethylformamide: DMF) を使用した。DMF は有機合成用の溶媒、触媒、ガス吸引剤等で使用されている。化学構造式は図 5. 7(b)である。濃度 12 wt% の PAN ナノファイバー溶液の調製過程は、まず、溶媒溶液 DMF を所定の分量をサンプル瓶に投入し、加熱装置付マグネティックスターラー(ASONE、RSH-4DN)で約 60℃に加熱する。

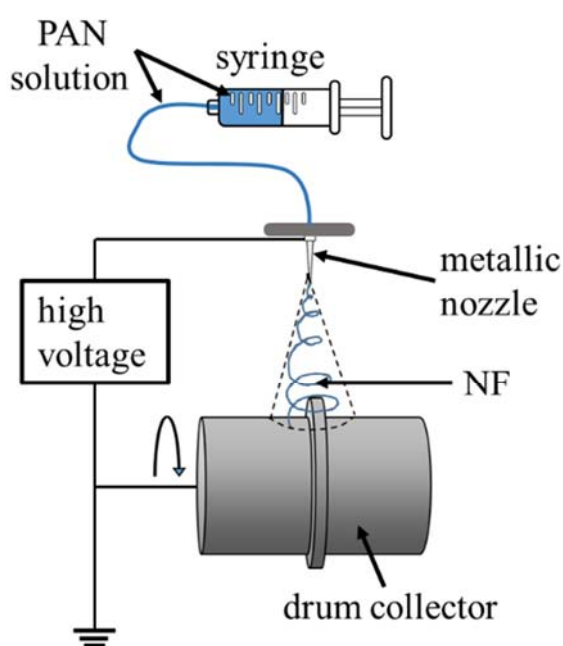


図 5. 8 エレクトロスピンニング概要図

次に高分子モノマーPAN を必要な分量を投入し、スターラーチップを入れて 60℃で約 6 時間攪拌する。PAN ナノファイバー溶液が完成した後にシリンジで吸い込み、ナノファイバーを作製準備のためにエレクトロスピンニング装置 (MECC、 NANON-03) に取り付け。次に、エレクトロスピンニングの概要図を図 5. 8 に示す。この装置は高電圧源、シリンジ、金属ノズルとアースされたコレクターから構成される。シリンジチューブにある PAN ナノファイバー溶液がフィードレート 1 ml/h で押し出されながら金属ノズルに高電圧 20 kV を印加するとにより、電荷を PAN ナノファイバー溶液中に誘起させる。その際、ノズル先端にある液滴が表面張力の影響を受けるため、球形から Taylor 円錐形へ変化する

る。金属ノズルとコレクター間の印加高電圧の電気引力が PAN ナノファイバー溶液の滴の表面張力を上回り、金属ノズル先から流体ジェットがアースされたコレクターに向け噴射される。その際、流体ジェット中の溶媒は徐々に揮発し、コレクターに到達するときには、ジェットサイズがナノサイズまで減少し、ナノサイズのファイバーが得られる。また、この装置のコレクターが回転可能なドラムであり、ドラムを高速回転させながらエレクトロスピニングを行うため、形成されるナノファイバーはコレクターの回転方向に沿って初期配向が与えられる。ナノファイバーの作製条件としてはナノファイバー溶液の濃度はもちろんであるがコレクターの回転速度もひとつの重要なパラメーターである。

5.3.3 改善原理

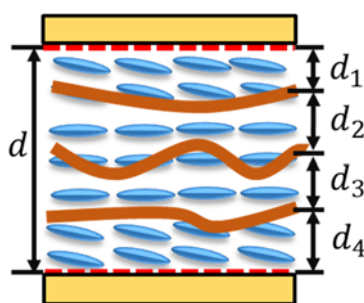


図 5.9 ネマティック液晶/ナノファイバー複合体

節 3.3 で説明したように、一般にネマティック液晶の電圧を除去した際の立ち下がり応答時間 τ_d は式(3.6)で与えられ、液晶層厚の2乗に比例する。図 5.9 にネマティック液晶/ナノファイバー複合体の概念図を示すが、液晶層内にナノファイバーが導入されると新たな界面となる。ナノファイバーと接する液晶分子がアンカーリングによる規制力を受けることから実質的に液晶層厚がナノファイバーの間隔であるとみなすことができ、液晶層厚は薄くなったと同様の効果が得られる。このように、実質的な液晶層厚を減少させることにより立ち下がり応答時間の改善を図るものである。

通常のネマティック液晶に駆動電圧を印加した際に分子が電圧に対して応答を始める閾値電圧 V_c は式(5.3)で与えられる[54-56]

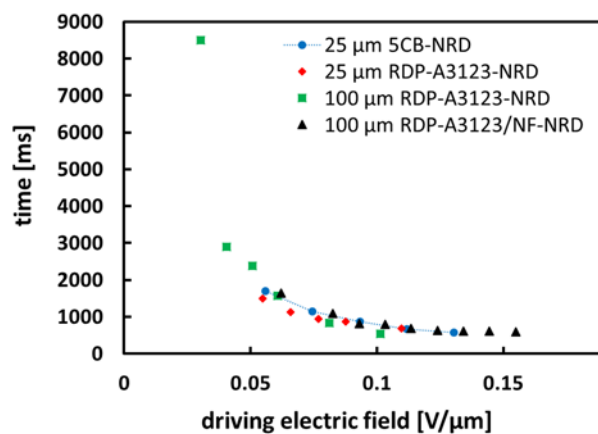
$$V_c = \pi \sqrt{\frac{K}{\epsilon_0 \Delta \epsilon}} \quad (5.3)$$

ここで、 ϵ_0 は真空中の誘電率であり、 $\Delta\epsilon$ は液晶の誘電異方性である。この式から閾値電圧は液晶層の厚さに依存せず一定であることがわかる。したがって、通常のネマティック液晶を用いた場合ではセルの厚さを増加させても閾値電圧は増加しない。しかしながら、ナノファイバーを用いた場合ではナノファイバーが界面として動作するため、ナノファイバー間隔ごとに閾値電圧が必要となり、セル全体での閾値電圧が増加することによって液晶を駆動するための電圧が増加する。

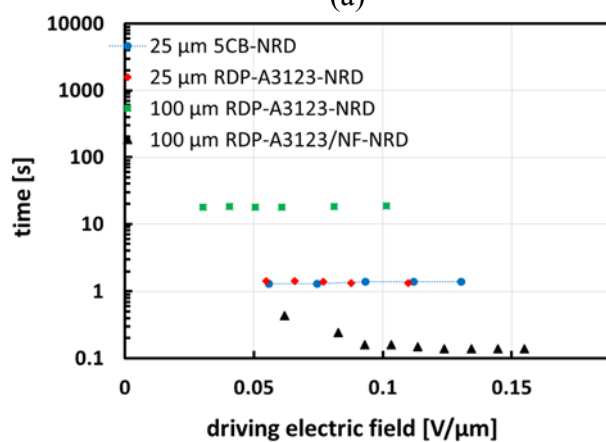
5.3.4 ナノファイバー複合体による液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の測定結果

図 5. 10 に 25 μm ネマティック液晶 RDP-A3123 を装荷した NRD ガイド型テラヘルツ波移相器(以下、25 μm RDP-A3123-NRD)、100 μm ネマティック液晶 RDP-A3123 を装荷した NRD ガイド型テラヘルツ波移相器(以下、100 μm RDP-A3123-NRD)および 100 μm ネマティック液晶 RDP-A3123 / ナノファイバー複合体を装荷した NRD ガイド型テラヘルツ波移相器(以下、100 μm RDP-A3123 / NF-NRD)の測定結果を示す。図 5. 10(a)、図 5. 10(b)および図 5. 10(c)はそれぞれ立ち上がり応答時間、立ち下がり応答時間および位相変化量である。本図においてネマティック液晶 5CB を装荷した NRD ガイド型テラヘルツ波移相器(25 μm 5CB-NRD)の測定結果もあわせて示す。図 5. 10(a)に示すように、立ち上がり応答時間はすべてのデバイスにおいて駆動電界に依存することを確認でき、駆動電界が高くなると減少することがわかる。また、駆動電界が 0.08 V/ μm より高い場合には各デバイスの立ち上がり応答時間はほぼ等しく、1 s 以下であることがわかる。次に、図 5. 10(b)に示すように、100 μm RDP-A3123-NRD および 25 μm RDP-A3123-NRD の立ち下がり応答時間はそれぞれ約 18.7 s および 1.4 s に対して 100 μm RDP-A3123/NF-NRD の立ち下がり応答時間が約 0.14 s である。この結果により、液晶層を薄くするよりもネマティック液晶 RDP-A3123 をナノファイバーと複合化した方が立ち下がり応答時間を大幅に改善できた。また同じ液晶層厚 100 μm のとき、液晶単体と比較するとナノファイバーと複合化したことで立ち下がり応答時間を約 134 分の 1 に短縮できたことがわかる。位相変化量に関しては図 5. 10(c)に示した通り、25 μm 5CB-NRD において約 39.5° であるに対して 25 μm RDP-A3123-NRD の位相変化量は約 75° であった。これに

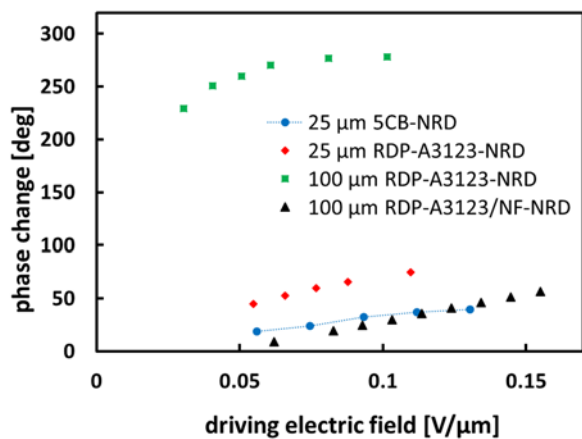
より、ネマティック液晶 RDP-A3123 を使用した方がより大きな位相変化量が得られることが明らかである。一方、100 μm RDP-A3123-NRD デバイスにおいて最大値が約 280° であるが 100 μm RDP-A3123/NF-NRD のデバイスにおいて最大値が約 60° 程度であった。よって、ネマティック液晶 RDP-A3123 をナノファイバーと複合することで位相変化量が大きく減少することがわかる。実験デバイスの誘電体長は 5 mm であるため、実用化する際、位相変化量 360° を有する移相器を実現するためには誘電体長 6 倍を延長する、すなわち 30 mm に延長する必要がある。液晶装荷マイクロ波ミリ波移相器と比べると 30 mm という長さは非常に短く、一般的にも実現可能性は十分にあるため、液晶層厚 100 μm ネマティック液晶 RDP-A3123/NF 複合体装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器はバランスが良い移相器であると考えられる。



(a)



(b)



(c)

図 5.10 ネマティック液晶 RDP-A3123 およびネマティック液晶 RDP-A3123 / NF 複合体装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の測定結果 (a) 立ち上がり応答時間、(b) 立ち下がり応答時間と (c) 位相変化量

5.4 今後の展望

ナノファイバーの改善効果を活用しながらNRDガイドの構造上においてPETフィルムスペーサーの代わりに紫外線硬化により、重合した高分子壁を用いて誘電体の部分を囲む構造を作製する。液晶材料としてネマティック液晶 RDP-A3123 (DIC) を使用し、重合性モノマーとしてUCL-DA4 (DIC) を用い、10wt%高分子混合液を調整する。図5.11に示すように、PETフィルムを用い金属平行平板液晶セル内部の透過型デバイスを作製後にデバイスの中心に幅4mmのマスキを装着し、調整した高分子混合液を注入し、紫外線照射により高分子化する。紫外線に当たった部分が高分子化して行き、重合性モノマー成分が減少して行く。マスクの遮断により紫外線が当たらない部分のモノマーが拡散現象により両端に移動して行くようになる。その繰り返しで最終的に、図5.12に示すように両側のデバイスに高分子安定化ネマティック液晶の壁が構築され、中心部分に液晶単体が残る。次にPETフィルムのスペーサー部分を切り除くことで位相差を増加させることを期待できる。また移相器の誘電体長を伸ばすことで位相変化量を増加させることもできると考えられる。

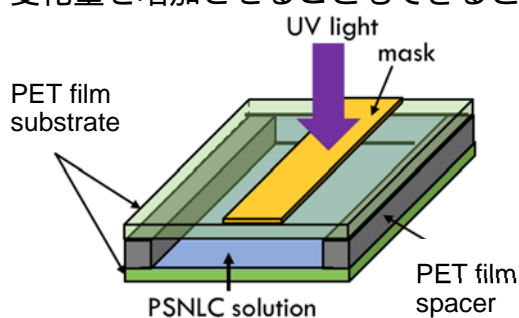


図 5.11 PSNLC 壁の構

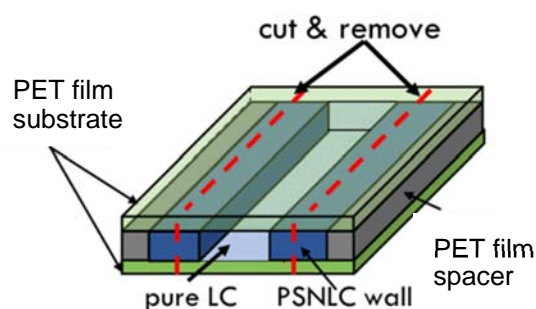


図 5.12 PSNLC 壁の作製

5.5 まとめ

本章では、二周波液晶および二周波駆動を用いた応答の改善方法を説明した。ネマティック液晶 RDP-A4188 を用いてNRDガイド型テラヘルツ波移相器およびITOガラス平行平板セルに装荷し、応答特性を測定し応答時間の改善を検討した。実験結果から、ネマティック液晶 RDP-A4188 を用いることで、液晶装荷NRDガイド型テラヘルツ波移相器において、大きな位相変化量が得られることが確認できた。また、二周波駆動の改善方法による立ち下がり応答時間改善は有効な方法であることが確認できたが、その改善度は低いことがわかった。理由は

液晶装荷NRDガイド型テラヘルツ波移相器に十分な電界を印加することができなかつたためである。この改善方法の効果を十分に発揮するためには、高周波数帯域での負の誘電異方性の大きさが低周波数帯域での正の誘電異方性と同程度に大きな液晶材料の選定が必要であることがわかつた。

次に、ナノファイバーの作製およびナノファイバー複合体による応答改善原理について説明した。その後、ネマティック液晶 RDP-A3123 / ナノファイバー複合体を用い、NRD ガイド型テラヘルツ波移相器に装荷し、デバイスの応答改善について検討した。液晶層厚 100 μm の単体ネマティック液晶 RDP-A3123 装荷NRDガイド型テラヘルツ波移相器の位相変化量および立ち下がり応答時間はそれぞれ約 280° と 18.7 s であるに対して、液晶層厚 100 μm のネマティック液晶 RDP-A3123 / ナノファイバー複合体装荷NRDガイド型テラヘルツ波移相器の位相変化量および立ち下がり応答時間が約 60° と 0.14 s であつた。これにより、ナノファイバーと複合化することで位相変化量は大きく減少したが、立ち下がり応答時間を大幅に減少させることができ、液晶単体と比較して約 134 分の 1 に短縮することができることがわかつた。立ち上がり応答時間は約 1 s であり、立ち下がり応答時間は約 0.14 s であり、位相変化量は約 60° であるため、本研究では液晶層厚 100 μm のネマティック液晶 RDP-A3123 / ナノファイバー複合体装荷NRDガイド型テラヘルツ波移相器は実用化の可能性が高くバランスの良いデバイスを実現できたと考えられる。

第 6 章 結論

本論文では液晶を用いたマイクロ波からテラヘルツ波可変移相器について研究を行った。液晶層が厚いため、印加駆動電界を除去した際の立ち下がり応答時間が非常に長くなる問題がある。応答時間が 1 s 以下を目標とし、各移相器の特性の研究を行いながら、それぞれの移相器に対して適切な応答改善方法について提案した。また、各移相器の位相変化量を考察し、実際のデバイスに応用する際に 360° の位相変化量を実現する可能性を検討した。論文を「マイクロ波からテラヘルツ波帯で動作する液晶装荷可変移相器に関する研究」と題して検討を行った。マイクロ波ミリ波領域において、プリント基板上に作製された CPW 伝送線路および MSL 伝送線路を用い、液晶単体を用いて動作確認を行った後、液晶層中に高分子ネットワークを導入した光重合型 PSNLC 装荷 CPW 型および MSL 型移相器について検討した。ミリ波やテラヘルツ波領域では、ガイド型導波路である NRD ガイドを用い、誘電体としてネマティック液晶を取り上げ、周波数が 260 ~ 400 GHz のテラヘルツ波帯における液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器をはじめ提案し、その動作確認と応答特性について検討した。また、立ち下がり応答時間の改善方法として二周波駆動による応答改善およびナノファイバーと複合した液晶/ナノファイバー複合体の使用による応答改善を検討した。

まず、第 1 章では液晶の歴史および分類など歴史的事項と本論文で取り上げたネマティック液晶の電界との相互作用等の特性を説明した。次に、液晶装荷マイクロ波ミリ波伝送線路について説明し、応答特性の問題を明確に提起し、過去の研究成果も含めて説明した。さらに、テラヘルツ波領域において液晶装荷テラヘルツ波伝送路を提案した。

第 2 章では液晶を用いたマイクロ波ミリ波移相器としての CPW 型移相器および MSL 型移相器の構造との相違点を述べ、さらにマイクロ波ミリ波移相器としての動作原理を説明した。また、CPW 型移相器および MSL 型移相器のそれぞれの構造における液晶層の境界面や電界の印加方向、高周波電界特性の比較などの違いから、マイクロ波ミリ波移相器としての特性や作製の容易さなどについて説明した。最後に、実際に作製した液晶単体装荷 CPW 型および液晶単体装

荷 MSL 型移相器の動作を確認し、それらの応答特性を検討した。

第 3 章では光重合型 PSNLC の概要を説明し、光重合型 PSNLC の調製とこれを利用したデバイスの立ち下がり応答時間の改善原理を述べ、本研究の用いるアンチパラレルラビングについて説明した。また、調整した光重合型 PSNLC 液晶セルの誘電異方性の駆動電界依存性および過渡応答による応答時間の測定について測定原理および測定方法を述べ、その結果について考察を行った。得られた結果をもとに、マイクロ波ミリ波移相器に装荷する光重合型 PSNLC を検討した。光重合型 PSNLC 装荷マイクロ波ミリ波移相器を MSL 型移相器および CPW 型移相器の 2 種類を作製し、位相変化の駆動電界依存性と立ち上がりおよび立ち下がり応答時間の駆動電界依存性を測定し、光重合型 PSNLC を用いたマイクロ波ミリ波移相器の特性を評価した。

第 4 章では、未開拓周波数と言われるテラヘルツ波の概要およびテラヘルツ波の応用について説明した。次に、基本 NRD ガイドの構造について説明するとともに、その動作原理について述べた。液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の動作確認およびデバイスの応答特性を検討するためにネマティック液晶 5CB を用いた。そのデバイスの構造を説明し、テラヘルツ波測定系による測定結果について述べた。

第 5 章では、ネマティック液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の応答時間を改善するために、二周波液晶の使用による改善方法およびナノファイバーと複合した液晶/ナノファイバー複合体の使用による改善方法を検討した。まず、二周波駆動の改善方法について説明し、ネマティック液晶 RDP-A4188 を用いた NRD ガイド型テラヘルツ波移相器および ITO ガラス平行平板セルの応答時間の改善を検討した。次に、ナノファイバーの作製および液晶/ナノファイバー複合体による応答改善原理について説明した。最後に、ネマティック液晶 RDP-A3123 / ナノファイバー複合体を用いて液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の応答改善について検討した。

本研究で得られた成果を以下にまとめる。

(1) ITO ガラス平行平板セルを用いて液晶単体および光重合型 PSNLC の特性を評価したところ、光重合型 PSNLC を装荷した場合には、立ち下がり応答時間は大きく改善されたが閾値電圧が増加し、誘電異方性 $\Delta\epsilon$ は小さくなることを確認した。またデバイスを作製する際には、パラレルラビングセルを使用すること

によりもアンチパラレルラビングセルを使用した方が、液晶分子がなめらかに立ち下がることがわかった。

(2) 光重合型 PSNLC の重合性モノマー濃度を変化し、それぞれの特性を評価した。高分子の濃度を増加させることで、誘電異方性 $\Delta\epsilon$ の減少量は大きくなるが立ち下がり応答時間に関してはより改善されることが分かった。ただし、高分子ネットワークを緻密にするほど、閾値電圧や飽和電圧も大きくなり、液晶分子が応答するように印加駆動電圧を大きくする必要があることがわかった。

(3) 光重合型 PSNLC 装荷 CPW 型および MSL 型マイクロ波ミリ波移相器を作製し、CPW 型移相器では上部基板から紫外線照射により高分子化を行い、また MSL 型移相器では側面から紫外線照射により高分子化を行った。それぞれの位相変化の印加駆動電界依存性および応答時間の評価を実施したところ、CPW 型移相器において、4 wt%光重合型 PSNLC を使用することにより、立ち下がり応答時間の改善を確認できたが、高周波電界の半分以上が液晶以外の部分を透過するため、位相変化が小さくなることが分かった。MSL 型移相器では側面から紫外線を照射したため、CPW 型移相器に比べ MSL 型移相器の方が、応答時間の改善には高い濃度の高分子の添加が必要であったが、同程度に応答時間を改善した時の位相変化は CPW 型より約 2 倍大きく、MSL 型の方が効率が良いことが確認できた。さらに、実際のデバイスに応用する観点から検討すると、液晶装荷 CPW 型移相器よりも液晶装荷 MSL 型移相器の方が容易に応用でき、より大きな位相変化量が得られることがわかった。

(4) テラヘルツ波領域において、NRD ガイドの固体誘電体部分の代わりにネマティック液晶を利用し、置き換えることで液晶装荷 NRD ガイドを実現できた。また、ネマティック液晶装荷 NRD ガイドはテラヘルツ波移相器としてはじめて提案し、実際にデバイスを作製し動作を確認できた。液晶層厚 25 μm ネマティック液晶 5CB 装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の立ち下がり応答時は約 1 s であり、位相変化量が約 40°であることが分かった。応答時間は本研究の目標をほぼ達成できたが、より改善されると望ましい。また、位相変化量を大きく得るために、ネマティック液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器の液晶部分の長さを増やす、あるいはより高い複屈折を有するネマティック液晶が必要である。本移相器を実際のデバイスに応用するためには、位相変化量と応答時間の両方をより改善する必要があることが分かった。

(5) ネマティック液晶 5CB より大きい複屈折を有するネマティック液晶 RDP-A4188 および RDP-A3123 を用い、二周波駆動の改善方法とネマティック液晶 / ナノファイバー複合体の使用による応答改善方法について検討した。ネマティック液晶 5CB と比較してネマティック液晶 RDP-A4188 を用いることにより約 1.5 倍大きい位相変化量が得られたが、二周波駆動による立ち下がり応答時間の改善度が低いことが分かった。これは、誘電異方性の符号が反転する周波数が高いため、デバイスに十分な電界が印加できなかったためであり、二周波駆動の改善方法の効果を十分に発揮させるためには測定系を改善または液晶材料の選定を検討する必要があることがわかった。一方、液晶層厚 100 μm ネマティック液晶 RDP-A3123 / ナノファイバー複合体装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器において、立ち上がり応答時間は約 1 s であり、立ち下がり応答時間は約 0.14 s であり、位相変化量は約 60° であるため、本研究ではマイクロ波からテラヘルツ波帯で動作する液晶装荷移相器において、本移相器は実用化の可能性が高く、バランスの良いデバイスを実現できたと考えられる。

本論文においては、応答時間が 1 s 以下という目標は達成でき、マイクロ波ミリ波移相器の応答改善に光重合型 PSNLC の使用が有効であることと、MSL 型移相器の方が CPW 型移相器と比べ効率が良いこと、実用化が有利であることを確認できた。さらに、テラヘルツ波領域において新たなデバイスとして液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器を実現し、デバイスの応答改善に二周波液晶の使用または液晶 / ナノファイバー複合体の使用の有効性があることを確認できた。本論文で得られた成果は、液晶を用いたマイクロ波からテラヘルツ波帯で動作する液晶装荷移相器の実現に寄与すると考えられる。

謝 辞

本研究は、防衛大学校 森武 洋 教授のご指導の下、取り組んだものであります。理工学研究科学生として 5 年間ご指導していただきましたが、この間大変貴重な経験をさせていただき、研究においては液晶だけでなく、幅広い分野にわたって多くの有益なご指導、ご助言をいただきましたこと、衷心より誠に感謝申し上げます。また、研究者としての思考や人生観などの精神的な面においても良い研鑽ができたと感じております。

本論文の作成にあたり、ご指導とご助言を賜りました防衛大学校 内田 貴司 教授、中野 俊樹 教授、大阪大学 尾崎 雅則 教授に心から感謝申し上げます。また、本研究を遂行するにあたり、内田 貴司 教授、立木 隆 教授には走査型電子顕微鏡の測定装置を快く使用させていただきましたことに深く感謝申し上げます。

本研究の遂行にあたって、貴重なアドバイスを賜りました同研究室の井上 曜 講師に厚く御礼申し上げます。電気電子工学科事務室 濱田 俊貴 氏には工作室でのデバイス作製にあたり、貴重なお知識や大切なお支えをくださることをはじめ、同研究室の研究科前期課程学生 小林 寛昌 二等陸尉、研究科後期課程学生 ドン・クォック・トアン 越陸軍上尉、研究科前期課程学生 鈴木 美穂 二等陸尉、研究科前期課程学生 服部 真代 二等空尉多くの方々から多大なご支援をいただけたことにより本研究を進めることができたものと、心から深く御礼申し上げます。

最後に、私事ではありますが、研究科学生生活や本研究活動を支えてくれたホストファミリーの小松 哲也 氏、小室 時恵 氏と全ての先輩、後輩、友人に感謝の意を表します。

平成 31 年 1 月
ブイ ヴァン バオ

参考文献

- [1] 松沢晋一郎、「車載用ミリ波レーダ」、電子情報通信学会誌, Vol. 98, No. 10, pp.899-904 (2015).
- [2] ダイムラー・クライスラー日本ホールディング:車載用 UWB 近距離レーダについて、情報通信審議会 UWB 無線システム委員会、2008-レ作-1-5 (2006).
- [3] S. Tokoro, et al.:" Electronically scanned millimeter-wave radar for pre-crash safety and adaptive cruise control system, Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings, p. 304-309 (June, 2003).
- [4] 佐藤正己：レーダで障害物検知 小型・低コスト化が進む、Auto-motive Technology, p.164-167(2007).
- [5] B. Widrow and S. D. Stearns, "Adaptive signal processing", Prentice-Hall (1985).
- [6] C. F. N. Cowan and P. M. Grant, "Adaptive filters", Prentice-Hall (1985).
- [7] M. H. Hayes, "Statistical Digital Signal Processing and Modeling", John Wiley & Sons (1996).
- [8] S. Haykin, "Adaptive Filter Theory", Prentice Hall (1996).
- [9] J. C. Sethares, J. M. Owens and C. V. Smith, Jr., "MSW non-dispersive electronically tunable time delay elements", Electron. Lett., Vol.16, pp.825-826 (1980).
- [10] J. C. Sethares: "Magnetostatic wave transducers", Proc. 1981 RADC Microwave Magnetic Tech. Workshop, pp. 117-132 (June, 1981).
- [11] M. R. Daniel, J. D. Adam: "Simple magnetostatic delay lines", Proc. 1981 RADC Microwave Magnetic Tech. Workshop, pp. 157-168 (June, 1981).
- [12] J. H. Collins, D. M. Hastie, J. M. Owens, C. V. Smith Jr.:"Magnetostatic wave terminations", Jpn. J. Appl. Phys., **49**, pp. 1800-1802 (March, 1978).
- [13] J. D. Adam, M. R. Daniel: "The status of magnetostatic devices", IEEE Trans., MAG-17, 6, pp. 2951-2956 (November, 1981).

- [14] S. N. Bajpat, R. W. Weinert and J. D. Adam, "Delay control via the bias-field angle in YIG films", *IEEE Trans. Magn.*, Vol.MAG-19, No.9, pp.1877-1879 (1983).
- [15] M. Tsutsumi, M. Masaoka, T. Ohara, N. Kumagai:"A new technique for magnetostatic wave delay lines", *IEEE Trans.*, MTT-29, 5, pp. 583-587 (June, 1981).
- [16] S. L. Blank, J. W. Nielsen: "The growth of magnetic garnet by liquid phase epitaxy", *J. of Crystal Growth*, 17, pp. 302-311 (1972).
- [17] L. R. Adkins, H. L. Glass: "Dispersion control in magnetostatic delay lines by means of multiple magnetic layer structures", *Ultrasonic Symp. Proc.*, pp. 526-531 (1980).
- [18] J. P. Castera, "Tunable magnetostatic surface wave oscillators", *IEEE Trans, Magn.*, Vol.MAG-14, pp.826-828 (1978).
- [19] R. L. Carter, J. M. Owens, W. R. Brinlee, Y. W. Sam and C. V. Smith, Jr., "Tunable magnetostatic surface wave oscillator at 4GHz", *IEEE MTT-S Dig.*, pp.383-385 (1981).
- [20] 九鬼孝夫, 野本俊裕, 内海要三, "MSW 飽和過渡応答特性改善のための一考察", *電子情報通信学会論文誌(C)*, Vol.**J84-C**, No.9, pp.856-863 (2001).
- [21] K. C. Lim, J. D. Margerum, and A. M. Lackner, "Liquid crystal millimetre wave electronic phase shifter", *Jpn. Appl. Phys. Lett.*, **62**, 1065 (1993).
- [22] Y. Utsumi, T. Kamei, T. Naito, and K. Saito, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **434**, 9 (2005).
- [23] F. Dubois, F. Krasinski, B. Splingart, N. Tentillier, C. Legrand, A. Spadlo and R. Dabrowski: "Large Microwave Birefringence Liquid-Crystal Characterization for Phase-Shifter Applications", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **47**, 3564 (2008).
- [24] 嶋田浩和, 九鬼孝夫, 藤掛英夫, 野本俊裕: "同軸線路による液晶のマイクロ波帯誘電特性の評価", *電子情報通信学会論文誌(C)*, Vol.**J85-C**, pp.776-777 (2002).
- [25] C. Hilsum, R. van de Poel, "Simplified electrode arrangement for TFT-matrix liquid crystal displays", *Displays* 7 [1] p.37 (1986).
- [26] Y. Koike, A. Mochizuki, K. Yoshikawa, "Phase transition-type liquid-crystal projection display", *Displays* 10 [2] p.93 (1989).

- [27] F. Leenhouts, S. M. Kelly, A. Villiger, “Novel ferroelectric smectic C liquid crystal mixtures for display applications”, *Displays* 11 [1] p.41 (1990).
- [28] M. Schadt, “Field-effect liquid-crystal displays and liquid-crystal materials: key technologies of the 1990s”, *Displays* 13 [1] p.11 (1992).
- [29] S. Kubota, “Ergonomic requirements for reflective liquid-crystal displays”, *Displays* 19 [3] p.121 (1998).
- [30] H. Fujikake, H. Sato, T. Murashige, “Polymer-stabilized ferroelectric liquid crystal for flexible displays”, *Displays* 25 [1] p.3 (2004).
- [31] K. C. Lim, J. D. Margerum, and A. M. Lackner, “Liquid crystal millimetre wave electronic phase shifter”, *Elec. Lett.*, **29**, 1065 (1992).
- [32] D. Dolfi, M. Labeyrie, P. Joffre, and J. P. Huignard, “Liquid Crystal microwave phase shifter”, *Electron. Lett.*, **29**, 926 (1993).
- [33] 森武洋, “強誘電性液晶を用いたマイクロ波・ミリ波可変移相器”, *液晶*, **12**, 48 (2008).
- [34] F. Goelden, A. Gaebler, M. Goebel, A. Manabe, S. Mueller, and R. Jakoby, “Tunable liquid crystal phase shifter for microwave frequencies”, *Electron. Lett.*, **45**, 686 (2009).
- [35] S. Mueller, P. Scheele, C. Weil, M. Wittek, C. Hock, and R. Jakoby, “Tunable passive phase shifter for microwave applications using highly anisotropic liquid crystals”, *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, **2**, 1153 (2004).
- [36] B. A. Belyaev, N. A. Drokin, and V. N. Shepov, “Application of microstrip resonators for the investigation of the microwave dielectric properties of liquid crystals”, *Tech. Phys.*, **40**, 216 (1995).
- [37] F. Sahbani, N. Tentillier, A. Gharsallah, A. Gharbi, and C. Legrand, “New tunable coplanar microwave phase shifter with nematic crystal liquid”, *3rd Int. Design Test Workshop*, 78 (2008).
- [38] N. Martin, P. Laurent, G. Prigent, P. Gelin, and F. Huret, “Technological eVolution and performances improvements of a tunable phase shifter using liquid crystal”, *Microw. Opt. Technol. Lett.*, **43**, 338 (2004).
- [39] J. Yeh, C. Chang, C.-C. Cheng, J.-Y. Huang, and S. Hsu, “Microwave characteristics of liquid-crystal tunable capacitors”, *IEEE Electron Device Lett.*,

- 26, 451 (2005).
- [40] S. Mueller, A. Moessinger, R. Marin, F. Goelden, A. Lapanik, W. Haase, and R. Jakoby, “Liquid crystals - Microwave characterization and tunable devices”, *Frequenz*, **61**, 217 (2007).
- [41] B. Splingart, N. Tentillier, F. Huret, and C. Legrand, “Liquid crystals applications to R.F. and microwave tunable components”, *Mol. Cryst. Liquid Cryst. Sci. Technol.*, **368**, 183 (2001).
- [42] T. Nguyen, B. T. Nguyen, R. Ozaki, and H. Moritake, “Analyses of Nematic Liquid Crystal Molecule Motion and Response Characteristics in Microstripline-Type Microwave Phase Shifter”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **52**, pp.121701-1 – 121701-2 (2013).
- [43] T. Kuki, H. Fujikake, and T. Nomoto, “Microwave variable delay line using dual-frequency switching-mode liquid crystal”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.*, Vol.50, No.11, pp.2604-2609 (2002).
- [44] H. Moritake, S. Morita, R. Ozaki, T. Kamei, and Y. Utsumi, “Fast Switching Microwave Phase Shifter of Coplanar Waveguide Using Ferroelectric Liquid Crystal”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **46**, pp.519-521 (2007).
- [45] Brookner, E., “Phased Arrays and Radars - Past, Present and Future ” *Microwave Journal*, Cover Feature (Jan, 2006).
- [46] R. J. Mailloux, “Phased Array Antenna Handbook” Artech House, Norwood, MA (1994).
- [47] N. Amitay, V. Galindo and C. P. Wu, “Theory and Analysis of Phased Array Antennas” John Wiley & Sons Inc., New York (1972).
- [48] G. A. Hampson and A. B. Smolders, “A fast and accurate scheme for calibration of active phased-array antennas,” in *IEEE AP-S Int. Symp. Digest*, pp.1040-1043 (1999).
- [49] 田端隆伸, 菊間信良, 堀智, 安里博一, 和田知久, “ 車載用地上デジタル放送受信のためのアダプティブアレーアンテナシステムの実験的研究,” *信学技報*, Vol. 108, No. 148, pp. 195-200 (July, 2008).
- [50] R . T . Compton , Jr., “Adaptive antennas: concepts and performance”, Prentice-Hall Inc (1988) .

- [51] 菊間信良, "アレーアンテナによる適応信号処理", 科学技術出版社 (1998) .
- [52] 折原 宏, "液晶の物理", 内田老鶴圃 (2004).
- [53] 竹添 秀男, "液晶・高分子入門", 裳華房 (2004).
- [54] 吉野 勝美, 尾崎 雅則, "液晶とディスプレイ応用の基礎", コロナ社 (1994).
- [55] P. G. de Gennes and J. Prost, "The Physics of Liquid Crystal", Clarendon Press (1993).
- [56] A. A. Sonin, "The Surface Physics of Liquid Crystals", Gordon and Breach (1995).
- [57] D. K. Yang and S. T. Wu, "Fundamentals of Liquid Crystal Devices", John Wiley & Sons (2006).
- [58] C. Rosenblatt, "Temperature-dependence of the anchoring strength coefficient at a nematic liquid crystal-wall", J. Phys. (Paris), **45**, 1087-1091 (1984).
- [59] I. C. Khoo and S. T. Wu, "Optics and Nonlinear Optics of Liquid Crystals", World Scientific (1993).
- [60] S. T. Wu and C. S. Wu, "Experimental confirmation of the Osipov-Terentjev theory on the viscosity of nematic liquid crystals", Phys. Rev. A, **42**, 2219 (1990).
- [61] S. T. Wu and D. K. Yang, "Reflective Liquid Crystal Displays", John Wiley & Sons (2001).
- [62] M. F. Vuks, "Determination of the optical anisotropy of molecules of aromatic compounds from the double refraction of crystals", Opt. Spectrosk, **20**, 644 (1966).
- [63] S. T. Wu, "Birefringence dispersions of liquid crystals", Phys. Rev. A, **33**, 1270 (1986).
- [64] F. Guerin, J. M. Chappe, P. Joffre, and D. Dolfi, "Modeling, synthesis and characterization of a millimeter-wave multilayer microstrip liquid crystal phase shifter", Jpn. J. Appl. Phys., **36**, 4409 (1997).
- [65] S. Chandrasekhar, 木村初男, 山下護共訳, "液晶の物理学", 吉岡書店 (1995).
- [66] 岡野光治, 小林駿介, "液晶・基礎編", 培風館 (1985).

- [67] 小西良弘, “ 実用マイクロ波技術講座 理論と実際 第 1 巻,” pp.119-124, 日刊工業新聞社, 東京 (2001).
- [68] 小西良弘, “ 高周波・マイクロ波回路の構成法,” pp.1-14, 総合電子出版社, (1993).
- [69] D. A. Williams: “Millimeter-Wave Components and Subsystems Built Using Microstrip Technology”, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-39, No. 5, pp. 768-774 (1991).
- [70] T. Yoneyama: “Millimeter-Wave Research Activities in Japan”, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-46, No. 6, pp. 727-733 (1998).
- [71] T. Itoh and J. Rivera: “A Comparative Study of Millimeter-Wave Transmission Lines”, Infrared and millimeter Waves, Vol. 9, Ch. 2, pp. 95-132 (1983).
- [72] 内海要三, 亀井利久, 内藤亮, 斎藤勝彦, “ マイクロストリップライン構造液晶デバイスの応答時間特性 ”, 電子情報通信学会論文誌(C), Vol. **J87-C**, No. 12, pp. 1086-1096 (2004).
- [73] 梅野修平, ゲン・タイン, 樋口博紀, 菊池裕嗣, 森武 洋, 2012 年日本液晶学会討論会, 3c07 (2012) .
- [74] T. Nguyen, S. Umeno, H. Higuchi, H. Kikuchi, H. Moritake, Jpn. J. Appl. Phys., **53**, pp. 01AE08-1- 01AE08-6 (2014).
- [75] 横田宗大, “ マイクロ波帯液晶装荷移相器のアダプティブアンテナ応用に関する研究 ”, 防衛大学校理工学研究科前期課程 48 期卒業論文 (2011).
- [76] 内海要三, 亀井利久, 内藤亮, “ マイクロストリップライン構造可変機能液晶デバイスの誘電特性 ”, 信学論 (C), Vol. **J87-C**, pp.39-48 (2004).
- [77] S. Morita, R. Ozaki, H. Moritake, T. Kamei, and Y. Utsumi, “Microwave Variable Phase Shifter of Microstrip and Coplanar Waveguide Structures Using Ferroelectric Liquid Crystal”, Mol. Cryst. Liq. Cryst., **476**, 351 (2007).
- [78] 内海 要三, ゲン・タイン・バク, 亀井 利久, 尾崎 良太郎, 森武 洋, “液晶装荷 CPW-FE 移相器における誘電異方性と応答時間のマイクロ波測定および理論計算”, 信学論(C), **J92-C**, 778 (2009).
- [79] L. Zohrabyan, A. Zohrabyan, and T. Galstian, “Fast electro-optic switch in perfluorinated acrylate stabilized nematic liquid crystal”, Optical Materials, **31**, 1189 (2009).

- [80] 菊池裕嗣, “高分子とキラル効果が広げる液晶の新しい世界 等方性液晶の異常 Kerr 効果”, 液晶, Vol. 9, pp. 82-95 (2005).
- [81] 菊池裕嗣, “戦略的創造研究推進事業発展研究(SORST)研究終了報告書”, 科学技術振興機構 (2007).
- [82] G.P. Crawford, A. Scharkowski, Y.K. Fung, and J.W. Doane, “Internal surface, orientational order, and distribution of a polymer network in a liquid crystal matrix”, Phys. Rev. E, **52**, 1273 (1995).
- [83] I. Dierking, “Polymer network-stabilized liquid crystals”, Advanced Materials, **12**, 167 (2000).
- [84] A. S. Sonin and N. A. Churochkina, “Liquid crystals stabilized by physical networks”, Polymer Science Series A, **55**, 353 (2013).
- [85] K. Altmann, M. Reuter, K. Garbat, M. Koch, R. Dabrowski, I. Dierking, “Polymer stabilized liquid crystal phase shifter for terahertz waves”, Optics Express, **21**, 12395 (2013).
- [86] Y. Utsumi, T. Kamei, K. Saito and H. Moritake, “Increasing the speed of microstripline-type polymer dispersed liquid crystal loaded variable phase shifter”, IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, Vol.53, No.11, pp.3345-3353 (2005).
- [87] Y. Haseba, N. Otsuka, H. Abe, H. Kikuchi, T. Kajiyama, “Electro-optical Properties of Liquid Crystal Molecules in the Induced Isotropic state by Polymer Network”, Trans. Mat. Res. Soc. Jpn., Vol.29, pp.815-818 (2004).
- [88] K. Izumi, Q. Niu, H. Kikuchi, Y. Imamura, N. Kaiya, N. Amaya, H. Yang, K. Rajesh, R. Kimura, T. Gunjima, H. Hasuo, T. Kajiyama, “(Polymer / Liquid Crystal) Composite Systems with Steep Electro-optical Response and Elucidation of its Mechanism based on Light Scattering and Dielectric Property”, Trans. Mat. Res. Soc. Jpn., Vol.29, pp.811-814 (2004).
- [89] 深澤良一, “分析・センシングのためのテラヘルツ波技術,” p.10, 日刊工業新聞社 (2013).
- [90] 米山務, “非放射性誘電体線路を使ったミリ波集積回路,” 電気情報通信学会論文誌 C, Vol.J73-C1, No.3, pp.87-94 (1990).
- [91] 米山務, “NRD ガイド:新しいミリ波へのアプローチ,” 電気学会誌,

- Vol.116, No.1, pp20-23 (1996).
- [92] 米山務, “NRD ガイドによる 60GHz 帯 1.5Gbps データ送受信機の技術,” RF ワールド No.11, pp.85-98, CQ 出版社 (2010).
- [93] T. J. Sill and H. A. von Recum: “Electrospinning: Applications in drug delivery and tissue engineering”, *Biomaterials*, Vol.29, No.13, pp.1989-2006 (2008).
- [94] Eugene D. Boland, Branch D. Coleman, Catherine P. Barnes, David G. Simpson, Gary E. Wnek, and Gary L. Bowlin: “Electrospinning polydioxanone for biomedical applications”, *Acta Biomater.*, Vol.1, No.1, pp.115-123 (2005).
- [95] S. Agarwal, J. H. Wendorff, and A. Greiner: “Use of electrospinning technique for biomedical applications”, *Polymer*, Vol.49, No.26, pp.5603-5621 (2008).
- [96] Z. Dong, S. J. Kennedy, and Y. Wu: “Electrospinning materials for energy-related applications and devices”, *J. Power Sources*, Vol.196, No.11, pp.4886-4904 (2011).
- [97] M. M. Hasani-Sadrabadi, I. Shabani, M. Soleimani, and H. Moaddel: “Novel nanofiber-based triple-layer proton exchange membranes for fuel cell applications”, *J. Power Sources*, Vol.196, No.10, pp.4599-4603 (2011).
- [98] H. K. Raut, A. S. Nair, S. S. Dinachali, V. A. Ganesh, T. M. Walsh, and S. Ramakrishna: “Porous SiO₂ anti-reflective coatings on large-area substrates by electrospinning and their application to solar modules”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Vol.111, pp.9-15 (April, 2013).

研究業績

刊行論文

1. Van Bao Bui, 井上 曜, 樋口 博紀, 菊地 裕嗣, 森武 洋, “光重合型高分子安定化ネマティック液晶によるマイクロストリップ線路型マイクロ波ミリ波移相器の応答改善”, 電気学会論文誌 A, Vol.137, No.6, pp.356 ~ 362 (2017年6月).
2. Van Bao Bui, Yo Inoue, and Hiroshi Moritake: “NRD waveguide-type terahertz phase shifter using nematic liquid crystal”, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.58, pp.022001-1 ~ 022001-8 (2019年1月).
3. Van Bao Bui, Yo Inoue, and Hiroshi Moritake: “Improvement of response time and phase change in nematic liquid crystal loaded NRD waveguide type terahertz phase shifter”, Japanese Journal of Applied Physics (投稿中).

国際会議

1. Bao Bui, Yo Inoue, and Hiroshi Moritake: “Improvement of Response Time in Microstrip Line Microwave and Milliwave Phase Shifter Utilizing Polymer Stabilized Nematic Liquid Crystal”, The 26th International Liquid Crystal Conference (ILCC2016), 592, Ohio, USA, 2016年8月.
2. Van Bao Bui, Yo Inoue, and Hiroshi Moritake: “Study on Response Time Improvement in Polymer Stabilized Nematic Liquid Crystal Loaded Microwave and Milliwave Phase Shifter”, The 3rd Asian Conference on Liquid Crystals (ACLIC2017), LCT-074, Tainan, Taiwan, 2017年2月.
3. Van Bao Bui, Toan Quoc Duong, Hiroaki Kobayashi, Yo Inoue, and Hiroshi Moritake: “Response time improvement in terahertz wave phase shifter using nanofiber and liquid crystal composite”, 14th European Conference on Liquid Crystals (ECLC2017), P42, Moscow, Russia, 2017年6月.
4. Van Bao Bui, Yo Inoue, and Hiroshi Moritake: “NRD waveguide type terahertz phase shifter using nematic liquid crystal”, The 27th International Liquid Crystal Conference (ILCC2018), P1-C2-27, Kyoto, Japan, 2018年7月.

国内学会

1. ブイ ヴァン バオ、グエン タイン、樋口 博紀、菊池 裕嗣、森武 洋: “マイクロ波ミリ波移相器における高分子安定化ネマティック液晶による応答改善”, 2014 年日本液晶学会討論会, PB36, 2014 年 9 月.
2. ブイ ヴァン バオ、樋口 博紀、菊池 裕嗣、井上 曜、森武 洋: “厚いネマティック液晶層を有するデバイスの高分子安定化による応答改善”, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 13-P15-10, 2015 年 3 月.
3. ブイ ヴァン バオ、樋口博紀, 菊池裕嗣, 井上 曜, 森武 洋: “高分子安定化ネマティック液晶装荷マイクロストリップ線路型マイクロ波ミリ波移相器の応答時間の検討”, 2015 日本液晶学会討論会, 3c10, 2015 年 9 月.
4. ブイ ヴァン バオ、樋口博紀, 菊池裕嗣, 井上 曜, 森武 洋: “ネマティック液晶装荷マイクロストリップ線路型マイクロ波ミリ波移相器の高分子安定化による応答時間改善”, 第 63 回応用物理学会秋季学術講演会, 14a-2A-9, 2015 年 9 月.
5. ブイ ヴァン バオ、井上 曜, 樋口 博紀, 菊池 裕嗣, 森武 洋: “光重合型高分子安定化ネマティック液晶によるマイクロストリップ線路型マイクロ波ミリ波移相器の応答改善”, 平成 28 年電気学会基礎・材料・共通部門大会, 5-F-p2-4, 2016 年 9 月 .
6. ブイ ヴァン バオ、森武 洋: “マイクロ波・ミリ波帯における液晶を用いた無線通信器用移相器の研究”, The 9th Vietnamese – Japanese Students’ Scientific Exchange Meeting S01-05, 2016 年 9 月.
7. Van Bao Bui , 小林 寛昌, Toan Quoc Duong , 井上 曜, 森武 洋: “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移相器”, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 5p-C13-3, 2017 年 9 月.
8. ブイ ヴァン バオ、井上 曜、森武 洋: “ネマティック液晶装荷 NRD ガイド型テラヘルツ波移相器”, 2018 日本液晶学会討論会, 2c04, 2018 年 9 月.