



Title	界面環境のパターン設計に基づく液晶波面制御デバイスに関する研究
Author(s)	塚本, 脩仁
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/96076
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

博 士 学 位 論 文

界面環境のパターン設計に基づく液晶波面制御デバイス
に関する研究

塚 本 脩 仁

2024 年 1 月

大阪大学大学院工学研究科

目次

第1章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	目的と構成	3
1.3	本学位論文における研究コンセプト	4
1.4	液晶の基礎	7
1.4.1	液晶とその分類	7
1.4.2	ネマティック液晶の連続体理論	7
1.4.3	ネマティック液晶中の光伝搬	9
第2章	液晶積層構造を有する反射型光渦生成素子を用いた同軸光渦生成	13
2.1	緒言	13
2.2	動作原理	15
2.2.1	提案素子	15
2.2.2	光伝搬解析	20
2.3	実験	35
2.3.1	素子作製	35
2.3.2	動作実証	42
2.4	結言	51
第3章	親液撥液パターンニングを用いた液晶フレネルゾーンプレートによる焦点距離の精密制御	52
3.1	緒言	52
3.2	原理	54
3.2.1	提案素子	54
3.2.2	光伝搬解析	58
3.3	実験	61
3.3.1	素子作製	61
3.3.2	動作実証	68
3.4	結言	77
第4章	親液撥液パターンニングを用いた液晶スパイラルゾーンプレートによる集光光渦生成	79
4.1	緒言	79

4.2	原理	81
4.2.1	提案素子.....	81
4.2.2	光伝搬解析.....	86
4.3	実験	88
4.3.1	素子作製.....	88
4.3.2	動作実証.....	94
4.4	結言	99
第5章	紫外線表面改質によるプレチルト角制御を用いた液晶偏向素子	100
5.1	緒言	100
5.2	紫外線照射したポリイミド配向膜上の液晶配向挙動	102
5.2.1	配向膜の表面自由エネルギー	102
5.2.2	液晶の配向挙動.....	110
5.3	デバイス作製および動作実証.....	116
5.3.1	素子作製.....	116
5.3.2	動作実証.....	120
5.4	結言	123
第6章	結論	124
参考文献	128
謝辞	143
研究業績	145

内容梗概

液晶 (liquid crystal) とは、液体 (liquid) と固体 (crystal) の中間の相状態のことである。液晶物質は流動性と異方性を併せ持つため、ディスプレイを代表とする電気光学デバイス応用において重要な物質系のひとつである。近年、液晶の分子配向場が界面環境に応じて空間的に分布した構造を有する液晶波面制御デバイスに関する研究が盛んとなっている。基板界面における液晶の配向自由度には方位角方向と極角方向が存在し、これらの配向状態を空間的に制御することで、デバイスの性能向上や新規な機能性付与が期待できる。そこで本学位論文では、液晶波面制御デバイスの高機能化および新機能開拓を目的とし、新たな界面環境のパターン設計手法および素子構造を提案し、提案デバイスの動作実証を行った。以下に各章の要約を示す。

第1章 序章

本博士学位論文における研究背景および目的を述べた。研究対象である液晶の基礎物理学について、光デバイス応用の観点から概説した。

第2章 液晶積層構造を有する反射型光渦生成素子による同軸光渦生成

光渦の多重化技術は幅広い光学分野で応用が期待され、液晶の自己組織性を利用したボトムアップ方式で作製可能な光渦生成素子が注目を集めている。しかしながら、光渦生成素子を用いて光渦を多重化する場合、素子同士の精密なアラインメント調整が必要であった。本研究では、パターン配向したネマティック液晶素子と一様配向したコレステリック液晶素子を組み合わせた液晶積層構造を提案し、同軸光線上に異なるふたつの光渦生成が可能で、それらの位相特異点の位置が一致していることを明らかにした。本研究成果は、素子同士のアラインメントフリーな光渦の多重化技術として応用が期待される。

第3章 親液撥液パターニングを用いた液晶フレネルゾーンプレートによる焦点距離の精密制御

機械駆動部の持たない可変焦点レンズは、一般的な機械式可変レンズと比べて多くの優位性を持ち、様々な方式が提案されてきた。その中でも特に、液晶レンズは電氣的に焦点距離を変調できる特徴から、光ピンセット技術と組み合わせた光学システムが提案されてい

る。しかしながら、従来の液晶レンズでは、精密な焦点距離制御を達成するために高倍率な対物レンズを使用する必要があり、光マニピュレーション可能な領域は制限されてきた。そこで本研究では、位相回折条件の変調に基づいて焦点距離を精密に制御可能な液晶フレネルゾーンプレートを提案し、その動作実証を行った。焦点距離の電圧感度は $3.6 \mu\text{m/mV}$ を達成し、ミリボルトオーダーの印加電圧に対してマイクロメートルオーダーの焦点距離制御が可能なことを明らかにした。

さらに、提案デバイスを作製するために新たな液晶配向パターンニング手法を開発した。フォトリソグラフィ法を用いることで同一基板上に濡れ性の異なる2つの配向膜をパターン形成でき、液晶の垂直配向領域と水平配向領域を明瞭に分割可能なことを明らかにした。

第4章 親液撥液パターンニングを用いた液晶スパイラルゾーンプレートによる集光光渦生成

集光した光渦は、レーザープロセッシングや光マニピュレーション、光通信、イメージング等の幅広い光学分野で必要な技術である。光渦の位相特異点とレンズ光軸が一致した集光光渦を得る手法として、スパイラルゾーンプレートと呼ばれる回折光学素子の利用が注目されている。しかしながら、従来のスパイラルゾーンプレートは、振幅変調に基づく場合が多く、効率が低かった。また、直接描画法を用いて作製するため、デバイス製造に多くの時間とコストが必要であった。そこで本研究では、親液撥液パターンニングを用いて液晶スパイラルゾーンプレートを作製し、単一素子構成で集光光渦が生成できることを明らかにし、従来主流であった振幅型に比べて約2倍の回折効率が得られることを実証した。さらに、親液撥液パターンニングは投影露光フォトリソグラフィ法を応用した液晶配向制御法であり、一括露光で配向パターンニング可能でマイクロメートルスケールの微細パターンを容易に作製可能なことを明らかにした。

第5章 紫外線表面改質によるプレチルト角制御を用いた液晶偏向素子

光配向法を用いて液晶の分子配向場を空間的に制御した回折光学素子は、ロール・ツー・ロールなどの塗布製膜プロセスを用いたボトムアップ方式で製造可能なため、注目を集めている。近年、液晶のプレチルト角が空間的に分布した構造が提案され、素子への電圧印加による動的な波面変調機能が実証された。しかしながら、基板界面における液晶の配向メカニズムは未解明であり、デバイス品質を担保できる界面配向制御法はまだ確立していない。そこで本研究では、紫外線表面改質によるプレチルト角制御に着目し、紫外線照射したポリ

イミド配向膜の表面自由エネルギーを 3 つの分子間相互作用（分散成分および双極子相互作用成分、水素結合成分）に成分分解して評価し、液晶と配向膜に働く分子間相互作用がプレチルト角の決定に重要な役割を果たしていることを見出した。さらに、紫外線照射量を空間的に制御することでプレチルト角分布を有する液晶偏向素子を作製し、その偏向動作を評価し、ビーム偏向角を電气的に変調可能なことを実証した。

第6章 結言

第2章から第5章で示した研究成果を総括し、本博士学位論文における結論を述べた。

第1章 序論

1.1 研究背景

液晶 (liquid crystal, LC) とは、液体 (liquid) と固体 (crystal) の中間の相状態のことである。液晶は流動性と異方性を併せ持つため、ディスプレイを代表とする電気光学デバイス応用において大変重要な物質系のひとつである^[1]。従来の液晶光学デバイス (光学シャッターや表示素子など) は、基板界面における液晶の分子配向場が全面で一様であった。一方で近年、界面環境のパターン設計に基づいて液晶の分子配向場が空間分布した構造を有する液晶波面制御デバイスに関する研究が盛んとなっている^[2]。

一般的に知られている液晶波面制御デバイスは、液晶空間光変調器 (LC spatial light modulator, LCSLM) である^[3, 4]。液晶空間光変調器は、基板界面において液晶が一様に配向しており、高精細なピクセル電極を用いて液晶層に電圧を印加し、その電位に応じて液晶の配向状態を制御し、光学的距離 (optical path length, OPL) を空間的に変調することで波面を制御できる。コンピューターホログラム計算により複雑かつリアルタイムな波面制御が可能であるが、非常に複雑な配線が必要となるため、素子の有効面積は約 30 mm 以下に制限されている。また、画素ピッチは 2-5 μm 程度であり、回折角は可視域で数 deg 程度に制限されている^[3]。一方で、基板界面における液晶の配向方位が空間分布した構造を有する液晶波面制御デバイスは、その配向パターンに応じて波面を変調できる^[5-8]。その原理は、ベリー位相に基づく位相変調である^[9, 10]。ベリー位相とは、液晶の配向方位に応じて付与される位相のことで、液晶の配向方位角 φ に対して 2φ の位相変調が生じ、液晶の配向方位角が $\varphi = 0 \text{ rad}$ から $\varphi = \pi \text{ rad}$ まで変化すると、ベリー位相は 0 rad から $2\pi \text{ rad}$ まで変化する。したがって、液晶の配向方位に対して一波長分の位相変調が実現でき、回折光学素子として機能する。このデバイスは一般に、ベリー位相素子 (Pancharatnam-Berry phase device) ^[11, 12]や幾何学位相素子 (geometric phase device, geometric hologram) ^[13-15]と呼ばれるが、他にも偏光回折素子 (polarization grating) ^[7, 16-18]、回折波長板 (diffractive waveplate) ^[2, 19-22]様々な名称があり、十分に統一がなされていない。本論文では、ベリー位相素子で統一する。

ベリー位相素子は、光配向法を用いて作製される。光配向法とは、光化学反応を利用して配向膜表面の分子構造を変化させ、その配向膜の状態に応じて、液晶の配向を制御する手法である^[23-26]。配向膜を局所的に光化学反応させ、界面環境をパターン設計することで液晶の分子配向場をパターンニングできる^[6, 14]。配向膜分子と液晶分子は一般に、メソスコピックスケール (典型的には、10-100 nm 程度) の空間分解能で相互作用することが知られており^[27]、

干渉露光などのホログラフィー技術を活用することで可視域のサブ波長周期構造が作製でき^[28]、非常に大きな回折角を達成できる^[29-31]。また、ロール・ツー・ロールなどの塗布製膜プロセスを用いたボトムアップ方式でデバイス製造可能なため、生産性にも優れる。このような特長から、近年、幅広い光学分野で応用が期待されている^[2]。

光配向法は昭和最後の年である 1988 年に通商産業省工業技術院の次世代プロジェクト「光反応材料」の中で提案された技術である^[22]。その後、1991 年には、液晶の配向方位が 0 rad および $\pi/2\text{ rad}$ の二値な配向パターンが報告され^[24, 25]、波面制御動作が実証された^[5]。2006 年には、液晶の配向方位が 0 rad から $\pi\text{ rad}$ まで連続的に分布した配向パターンが報告され、100%に近い回折効率が達成された^[6]。この報告では、液晶材料に光重合性液晶 (reactive mesogen, RM) が用いられた。翌年には、ねじれの向きが異なる 2 つのキラル液晶を鏡映対称に積層した構造が提案され^[32, 33]、可視域全体で動作するアクロマティックな回折素子が実現した。さらに、複数のキラル液晶を積層することで高効率なアクロマティック動作が達成され^[34-36]、キラル液晶層の膜厚やピッチを設計することで動作波長域を最適化できることが明らかとなった。また、ベリ一位相素子と波長板を一对とする光学モジュールを複数積層し、各素子を電氣的に変調することで、動的な波面変調が可能なが明らかとなった^[37-39]。上記で提案は全て透過型デバイスであったが、コレステリック液晶を用いることで反射型デバイスとして機能することも実証された^[40, 41]。そして、これまでの液晶波面制御デバイスでは、基板界面における液晶の分子配向場の空間分布は方位角方向のみに制限されてきたが、近年、極角方向の空間分布を有する液晶波面制御デバイスが提案され^[42]、電圧印加によりビーム偏向角を動的に変調可能なが示され^[43]、デバイス性能評価に関する研究が盛んとなっている^[44-51]。したがって、これまでの研究では様々な液晶材料を用いて素子構造を設計することでデバイス開発が進められてきたが、今後の研究では高度な界面環境のパターン設計が重要となっている。

1.2 目的と構成

このような背景から本学位論文では、基板界面における液晶の方位角配向および極角配向を制御可能な新たな界面環境のパターン設計手法を提案し、液晶波面制御デバイスの高性能化および新機能の開拓に関する研究を行った。本学位論文の章構成は以下である。第1章では、本博士学位論文における研究背景および目的、研究コンセプトを述べた後、研究対象である液晶の基礎物理学について光デバイス応用の観点から概説した。第2章では、パターン配向液晶素子とコレステリック液晶素子を組み合わせた液晶積層構造を有する反射型素子の提案および動作実証について述べた。第3章では、フォトリソグラフィ法を用いて濡れ性の異なる2つの配向膜を同一基板上に形成する新しいパターンニング手法（親液撥液パターンニング法）の提案、親液撥液パターンニング法を用いて液晶フレネルゾーンプレートの作製および動作実証について述べた。第4章では、親液撥液パターンニング法を用いた液晶スパイラルゾーンプレートの作製および動作実証について述べた。第5章では、紫外線表面改質を用いたプレチルト角制御手法の提案、プレチルト角分布を有する液晶偏向素子の作製および動作実証について述べた。第6章では、第2章から第5章までの研究成果を総括し、本博士論文における結論を述べた。

1.3 本学位論文における研究コンセプト

基板界面における液晶の配向状態（界面環境と液晶の自己組織化）

図 1.1 に基板界面における液晶の配向状態を示す。棒状の分子形状を有する液晶分子は、熱揺らぎを持って平均的に分子長軸方向に揃って配向し、その配向方向はベクトルとして表される。液晶の配向ベクトル（液晶ダイレクタ）には、方位角方向（azimuth angle）と極角方向（pretilt angle）、二つの方向の自由度が存在する。基板界面における液晶の配向方向は、基板表面の分子との相互作用を強く受ける。したがって、基板界面における液晶の配向方向を制御するためには、界面環境（surface condition）の設計が重要となる。特に、液晶波面制御デバイスの場合、液晶の分子配向場が空間的に分布した構造を構築する必要があり、局所的な領域ごとに異なる界面環境を設計する技術が求められる。

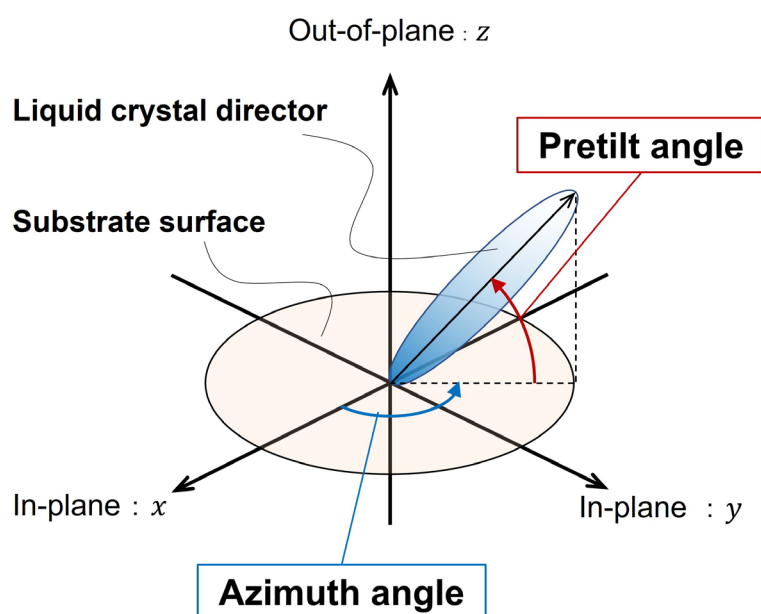


図 1.1 基板界面における液晶の配向自由度

本研究が目指す素子構造

図 1.2 に界面環境のパターン設計に基づく液晶波面制御デバイスの素子構造を示す。図 1.2(a)および(b)は、それぞれ現在主流の素子構造および本研究が目指す素子構造を示す。現在主流の素子構造は、液晶の分子配向場が方位角方向に空間分布した構造を有し、幾何学的な配向パターンに応じて透過光波面を変調できる。しかしながら、一度構築した配向パターンを再構築することは難しく、動的な波面変調を実現することは困難であった。そこで、本研究では、液晶の分子配向場が極角方向に空間分布した構造の実現を目標とした。この構造は、光学的距離に基づいて透過光波面を変調できるため、基板間に電圧を印加し、液晶を再配向させることで動的な波面変調機能を達成できる。提案構造をパターン設計すれば、可変焦点レンズやビームスキャン素子等が実現できる。これらのデバイスは、近年、VR/AR や LiDAR センシング、ヘルスケアなどの分野で注目を集めており、その応用が期待される。

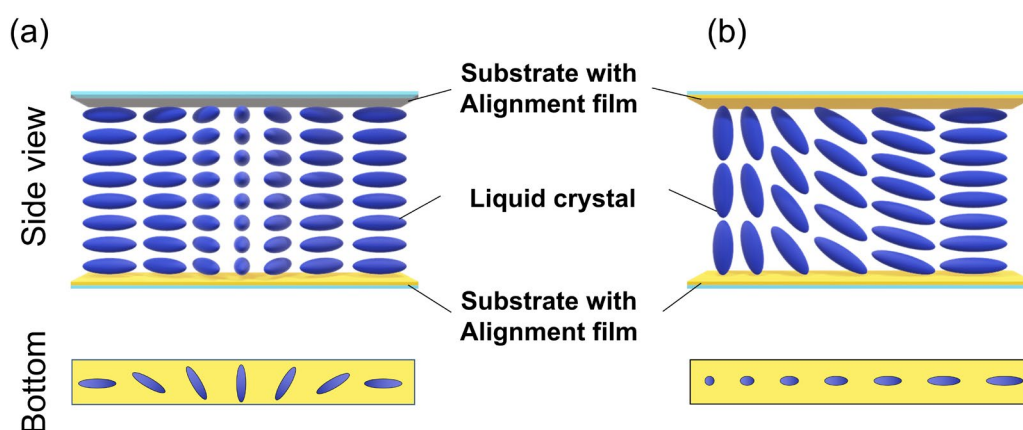


図 1.2 界面環境のパターン設計に基づく液晶波面制御デバイスの素子構造：(a) 現在主流の素子構造、(b) 本研究が目指す素子構造

研究アプローチ

図 1.3 に提案構造を実現するための研究アプローチを示す。本研究では、(a) 方位角配向分布を有する構造、(b) 水平配向と垂直配向の二値な配向分布を有する構造、(c) 極角配向分布を有する構造の順に検討し、提案構造の実現を目指した。

(a) 方位角配向分布を有する構造

アゾ分子の光異性化反応を利用した光配向法を用いて構造を実現した。アゾ分子に直線偏光の紫外線を照射すると光異性化反応を繰り返し、直線偏光方位に垂直な方向に配向する。したがって、直線偏光方位を空間的に制御することでアゾ分子の配向方位が空間分布した界面環境が得られ、液晶の方位角配向が空間分布した構造が得られる。

(b) 水平配向と垂直配向の二値な配向分布を有する構造

フォトリソグラフィ法と光配向法を組み合わせた配向パターンニング技術を提案した。フォトリソグラフィ法により同一基板上に濡れ性の異なるふたつの配向膜をパターン形成することで、一様な垂直配向および一様な水平配向が明瞭に分割された構造が実現できる。

(c) 極角配向分布を有する構造

紫外線照射したポリイミド膜の表面改質を利用した手法を検討した。先行研究において^[52]、垂直配向性のポリイミド膜に紫外線を照射すると、紫外線の照射時間に応じて表面自由エネルギーが連続的に変化し、液晶のプレチルト角が制御できるとの報告があるが、その配向メカニズムは明らかとなっておらず、プレチルト角の空間制御は困難であった。本研究では、紫外線照射量を空間的に制御することでプレチルト角が空間分布した構造が実現できることを実証した。

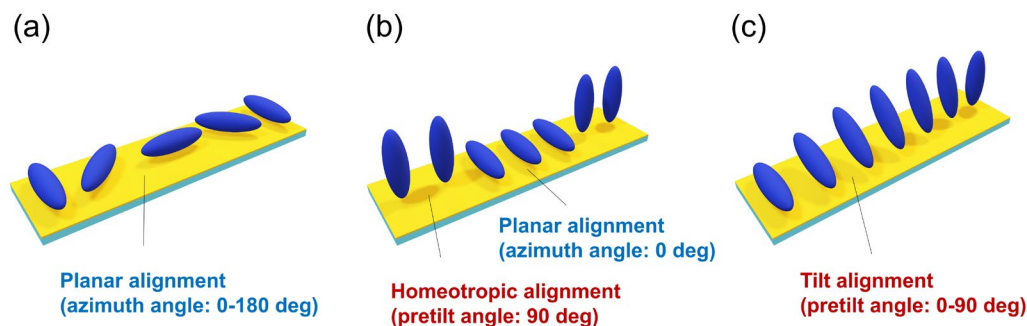


図 1.3 提案構造を実現するためのアプローチ：(a) 方位角配向分布、(b) 二値配向分布、(c) 極角配向分布

1.4 液晶の基礎

1.4.1 液晶とその分類

液晶 (liquid crystal) は固体と液体の中間相状態のことである。液晶物質は、流動性と異方性を併せ持つ柔軟な物質である。図 1.4 に典型的な液晶分子 5CB (4'-n-pentyl-4-cyano-biphenyl) の分子構造を示す。剛直なコアであるビフェニル部と柔軟な炭化水素鎖で構成され、棒状の分子形状を持つ。液晶の発現には、分子形状が重要であり、剛直な部位と柔軟な部位のバランスによって液晶性が発現すると考えられている。

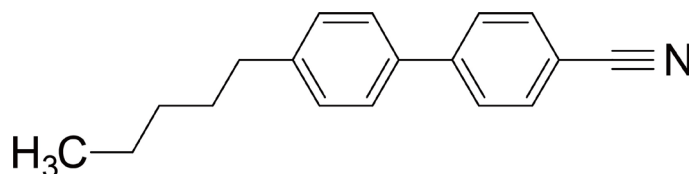


図 1.4 5CB (4'-n-pentyl-4-cyano-biphenyl) の化学構造

1.4.2 ネマティック液晶の連続体理論

配向ベクトル

液晶分子は長軸方向を揃えて配向しているが、熱による揺らぎが存在するため、完全に平行に配向しているわけではない (図 1.5)。この平均的な配向方向はベクトルで表すことができ、この配向ベクトル \mathbf{n}_{LC} または液晶ダイレクタ (director) と呼ぶ。液晶分子の長軸がどの程度ダイレクタ方向に沿って配向しているかという配向度合いは、オーダーパラメータ S で定義される。分子の長軸がダイレクタとの間になす角 θ_i を用いて

$$S = \frac{1}{2} (3 \langle \cos^2 \theta_i \rangle - 1) \quad (1.8)$$

ここで、 θ_i は液晶分子の長軸と配向ベクトルのなす角、 $\langle \cos^2 \theta_i \rangle$ は $\cos^2 \theta_i$ の平均を意味する。分子が完全にダイレクタ方向 \mathbf{n}_{LC} を向いている場合、 $\langle \cos^2 \theta_i \rangle = 1$ となり、 $S = 1$ となる。一方で等方相のように分子が完全にランダムな方向を向いている場合、 $\langle \cos^2 \theta_i \rangle = 1/3$ となり、 $S = 0$ となる。

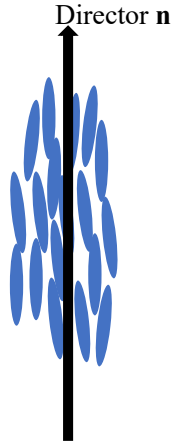


図 1.5 ネマティック液晶の配向ベクトル

ネマティック液晶の弾性理論

一般、物質に様なひずみを加えて物質内の隣接した分子など二点間の距離に変化が生じた場合、その変化に対する復元力が生じる。これは物質の弾性に起因するもので、液晶においても同様のことが起こる。ネマティック液晶では分子の方向に関する秩序が存在するため、平均的配向方向を示すダイレクタに空間的な不均一が生じ、その領域の自由エネルギーが増大し、そのダイレクタの変形に対する復元力が働く。復元力が、フックの法則に応じて、ダイレクタ \mathbf{n} の変形に比例すると仮定するとダイレクタの変形に伴う Frank の弾性エネルギー密度 f_{frank} は、2 次関数で与えられ、次式のようにになる。

$$f_{\text{frank}} = \sum_i K_i a_i + \frac{1}{2} \sum_{ij} K_{ij} a_i a_j \quad (i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$$

ここで、 K_i 、 K_{ij} は弾性定数である。ネマティック液晶の場合は、対称性により弾性定数の数は大きく減少することになり、最終的に f_{frank} は次のようになる。

$$f_{\text{Frank}} = \frac{1}{2} K_{11} (\nabla \cdot \mathbf{n})^2 + \frac{1}{2} K_{22} \{\mathbf{n} \cdot (\nabla \times \mathbf{n})\}^2 + \frac{1}{2} K_{33} \{\mathbf{n} \times (\nabla \times \mathbf{n})\}^2$$

ここで、 K_{11} 、 K_{22} 、 K_{33} は、それぞれ広がり、ねじれ、曲がり変形に対する弾性定数を意味し、Frank の弾性定数と呼ばれる。

1.4.3 ネマティック液晶中の光伝搬

屈折率楕円体

等方性媒質の中では電界によって誘起された分極は、電界と平行方向であり、電界 \mathbf{E} と電束密度 \mathbf{D} との関係は誘電率 ϵ と真空誘電率 ϵ_0 を用いて次式で表される。

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon \mathbf{E}$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \epsilon_0 \epsilon \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}$$

添字の 1、2、3 は媒質中に任意にとった座標である。一方、異方性媒質は分極方向が媒質内で異なるため、電界 \mathbf{E} と電束密度 \mathbf{D} の方向は必ずしも平行とはならず、誘電率テンソル ϵ を用いて次式で表される。

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon \mathbf{E}$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \epsilon_0 \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}$$

ここで、誘電率テンソルの成分 ϵ_{ij} の値は、座標の取り方に依存しており、適当な座標変換により誘電率テンソルは常に対角化され、

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \epsilon_0 \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}$$

と書くことができる。このような軸 x 、 y 、 z を電気的主軸（誘電率テンソルの主軸）という

次に、異方性媒質中を伝搬する平面波を考える。角振動数 ω の光が位相速度 v_p で、単位ベクトル \mathbf{s} で決まる方向に伝搬する場合を考えると、位置 \mathbf{r} における電磁界ベクトル \mathbf{E} 、 \mathbf{D} 、 \mathbf{H} 、 \mathbf{B} は次式に比例する。

$$\exp \left\{ j\omega \left(t - \frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{s}}{v_p} \right) \right\}$$

ここで、 t は時間変数である。なお、 j は虚数単位を表す。媒質中は電荷が存在せず損失が少ないため、この電磁波を電荷の存在しない媒質中のマクスウェル方程式を満たす必要があり、次式が得られる。

$$\frac{s_x^2}{v_p^2 - v_x^2} + \frac{s_y^2}{v_p^2 - v_y^2} + \frac{s_z^2}{v_p^2 - v_z^2} = 0$$

ここで、 v_x 、 v_y 、 v_z は極座標系の各軸方向の伝搬速度を示す。この式は Fresnel の方程式と呼ばれる。Fresnel の方程式を解いて位相速度 v_p を求めると、 v_p^2 に関する 2 つの解が得られる。このことは、 \mathbf{s} 方向に伝搬する光には 2 つの位相速度が存在することを示す。

このように異方性媒質中ではある光の伝搬方向によって位相速度が異なるということは、伝搬方向によって屈折率が異なり、また、ある方向に対して 2 つの位相速度を持つことは、

同じ方向に対して 2 つの屈折率を持つことを意味している。屈折率の異方性を考えるうえで、屈折率楕円体を考えると便利である。

$$\left(\frac{x}{n_x}\right)^2 + \left(\frac{y}{n_y}\right)^2 + \left(\frac{z}{n_z}\right)^2 = 1$$

ここで、 n_x 、 n_y 、 n_z は主屈折率である。原点を通って \mathbf{s} 方向に伝搬する光を考え、波面に垂直な平面で屈折率楕円体を切ると、切断面は長軸と短軸を持った楕円になる。この時の長軸と短軸の長さがそれぞれ \mathbf{s} 方向に伝搬する光の 2 つの位相速度に対応した屈折率 n' 、 n'' となる。光学異性体媒質はこの屈折率楕円体の形によって分類できる。

- $n_x = n_y = n_z$ の場合

屈折率楕円体は球になり、どの伝搬方向 \mathbf{s} に垂直に切っても切断面は円になる。すなわちどの方向に対しても位相速度が同じであることを意味し、これは等方性媒質である。

- $n_x = n_y \neq n_z$ の場合

屈折率楕円体は z 軸方向に伸びた楕円となる。ここで、 $n_x = n_y = n_o$ 、 $n_z = n_e$ とおく。 $n_x = n_y \neq n_z$ の場合、光軸は 1 つだけ存在する物質を一軸性媒質と呼ぶ。原点を通る任意の方向 \mathbf{s} に伝搬する光を考えたとき、一軸性媒質の場合には、その波面の長軸の長さ n_e は変化するが、短軸の長さは常に n_o となる。方向によって変化しない屈折率 n_o 、すなわち位相速度を持つ光は等方性媒質と同じように光の速度が方向に無関係であることから常光線と呼ばれる。一方、方向によって屈折率の変化する光を異常光線という。この場合の屈折率 n' は、 z 軸と光の進行方向とのなす角を θ とすると、次式で与えられる。

$$n' = \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_e^2 \cos^2 \theta + n_o^2 \sin^2 \theta}}$$

光学軸に対して角度 θ で伝搬する異常光のエネルギー伝搬方向と伝搬方向 \mathbf{s} が一致せず、複屈折現象が起こる。

- $n_x \neq n_y \neq n_z$ の場合

2 つの位相速度、屈折率が等しくなるというような光学軸が 2 つ存在する物質は、二軸性媒質と呼ばれる。

ジョーンズ解析

偏光子や異方性媒質を通過する光の偏光状態を考えると、まず入射光をジョーンズベクトルで書き、それぞれの光学素子をジョーンズ行列で表し、それぞれを掛け算することにより出射光の偏光状態が求められる。

図 1.6 のように厚さ d で y 軸と角度 ψ をなす光学軸をもつ一軸性媒質を考える。異方性媒質内を光が伝搬するときには 2 つの位相速度が存在するが、一軸性媒質内ではこの 2 つは常光と異常光であり、直交している。図 1.6 では異常光、常光の偏光方向をそれぞれ e 軸、 o 軸とする。この板に z 軸方向に伝搬する直線偏光

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix}$$

が入射した場合を考える。この光がこの異方性媒質内を伝搬する場合を考えるとき、常光 V_o と異常光 V_e の成分に変換して書き換える。つまり

$$\begin{bmatrix} V_e \\ V_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi \\ -\sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix}$$

を施す。位相速度はそれぞれ異なって伝搬していき、距離 d だけ伝搬した時の偏光状態は変化する。ここで、常光、異常光の屈折率をそれぞれ n_o 、 n_e とすると、それぞれの位相は $2\pi n_o d/\lambda$ 、 $2\pi n_e d/\lambda$ ずれるため、次式で表される。

$$V'_e = \exp\left(-\frac{j2\pi n_e d}{\lambda}\right) V_e$$

$$V'_o = \exp\left(-\frac{j2\pi n_o d}{\lambda}\right) V_o$$

ここで厚さ d だけ伝搬する間の位相差 Γ と絶対的な位相の変化 Φ を、以下の式で表す。

$$\Gamma = \frac{2\pi|n_e - n_o|d}{\lambda}$$

$$\Phi = \frac{\pi|n_e + n_o|d}{\lambda}$$

液晶を伝搬する常光と異常光は、次式で表すことができる。

$$\begin{bmatrix} V'_e \\ V'_o \end{bmatrix} = e^{-j\Phi} \begin{bmatrix} e^{-\frac{j\Gamma}{2}} & 0 \\ 0 & e^{\frac{j\Gamma}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_e \\ V_o \end{bmatrix}$$

そして、液晶を透過した光は次式で表すことができる。

$$\begin{bmatrix} V'_x \\ V'_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V'_e \\ V'_o \end{bmatrix}$$

したがって、回転行列 $\mathbf{R}(\psi)$ 、常光と異常光の位相差 Γ の媒質のジョーンズ行列 $\mathbf{W}(\Gamma)$ を用いて次式のように記述することができる。

$$\begin{bmatrix} V_x' \\ V_y' \end{bmatrix} = \mathbf{R}(-\psi) \mathbf{W}(\Gamma) \mathbf{R}(\psi) \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R}(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi \\ -\sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix}, \mathbf{W}(\Gamma) = e^{-j\phi} \begin{bmatrix} e^{-\frac{j\Gamma}{2}} & 0 \\ 0 & e^{\frac{j\Gamma}{2}} \end{bmatrix}$$

ここで、図 1.4 のように 2 枚の偏光子を用いてクロスニコルで挟んだ場合を考える。入射強度を 1 とすると、最初の y 軸方向の偏光子 P を通過した後の光は、次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

また、検光子のジョーンズベクトルは次式で与えられる。

$$\mathbf{P}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

したがって、クロスニコルを透過した光は次式で表される。

$$\mathbf{V}' = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{R}(-\psi) \mathbf{W}(\Gamma) \mathbf{R}(\psi) \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = -\frac{j}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \sin(2\psi) \sin\left(\frac{\Gamma}{2}\right) \\ 0 \end{bmatrix}$$

そして、出射光強度 I は、次式で与えられる。

$$I = \left| -\frac{j}{\sqrt{2}} \sin 2\psi \sin\left(\frac{\Gamma}{2}\right) \right|^2 = \frac{1}{2} \sin^2(2\psi) \sin^2\left(\frac{\pi \Delta n d}{\lambda}\right)$$

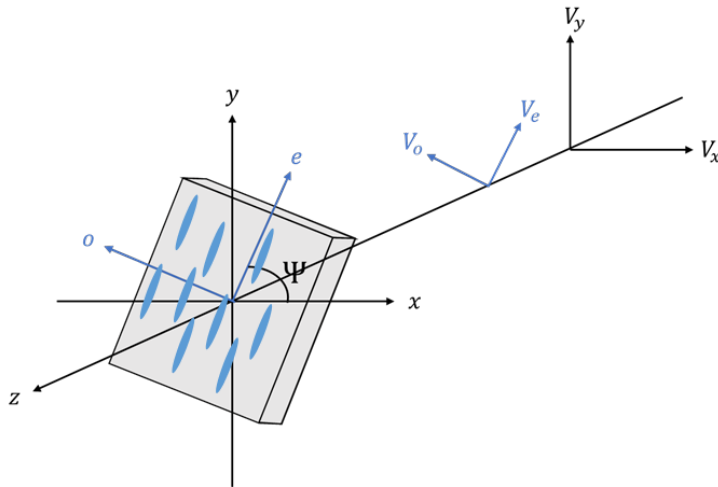


図 1.6 一軸性媒質中の光伝搬

第2章 液晶積層構造を有する反射型光渦生成素子を用いた同軸光渦生成

2.1 緒言

光渦の多重化技術は近年、光通信^[53-61]やレーザープロセッシング^[62-71]、光マニピュレーション^[72-74]など幅広い光学分野でその応用が期待されている^[75]。光渦とは、螺旋状の波面を有する光のことでポインティングベクトルと波数ベクトルの向きが一致せず、光子は螺旋を描きながら伝搬する^[56]。このため、光渦は光の軌道角運動量（orbital angular momentum, OAM）を有する。光の軌道角運動量の大きさは波面のトポロジー、すなわち螺旋波面の回転周期 ℓ に依存し、ひとつの光子あたり $\pm\ell\hbar$ の値を有する。ここで、符号 \pm は螺旋波面の向きに対応する。この軌道角運動量は1992年にAllenらによって実証された新しい物理量で^[76]、光の新たな自由度として認識され、学術的にも応用的にも研究が盛んに行われている^[77]。

光渦の軌道角運動量は理論上、無限大の値を取ることができ^[78]、複数の光渦を多重化できる特長から、テラビット級の大容量光通信の実現^[53, 57, 61]や螺旋構造体の構造制御^[65, 70, 71, 79, 80]、微小物体の高効率な捕捉^[72, 81]に関する研究が報告されている。光渦を多重化には、空間光変調器^{[82][83][84]}、光渦生成素子^{[77][85]}が用いられる。空間光変調器はコンピューターホログラム技術により複雑な位相パターンを形成でき^[75, 84]、電氣的に位相パターンを再構築可能なため、リアルタイムな応答制御が可能である。しかしながら、実現できる位相パターンは装置の空間分解能に律速される。光渦の螺旋軸上に存在する位相特異点の大きさは数十 nm から数 μm 程度と非常に微小であるが^[86, 87]、液晶空間光変調器（liquid crystal spatial light modulator, SLM）の画素ピッチは一般に2-5 μm 程度であり、生成可能な光渦のトポロジカルチャージの大きさや多重数は制限されている^[86, 88]。一方で、光渦生成素子には、スパイラルフェーズプレート（spiral phase plate, SPP）^[89]やメタサーフェス^[90, 91]、フォトニック結晶スラブ^[92]、オンチップ導波路^[93, 94]など様々な方式が提案されている^[86]。これらのデバイスは半導体微細加工技術を応用したトップダウン方式で作製されるため、ナノオーダーの空間分解能を持つ光渦生成が可能であるが、生産性に課題がある。他方で、 q -plate と呼ばれる光渦生成素子は、液晶の自己組織性を利用したボトムアップ方式で作製可能であり、非常に生産性に優れる^[12, 18, 95-98]。また、 q -plate は純粋な円偏光の光渦を生成できる特長を有し、光渦の偏光多重が容易であり、空間的に偏向状態が分布したベクトルビームの生成やより複雑に構造化されたビーム（structured light）の生成が報告されている^[95, 99]。しかしながら、光渦生成素子を用いた場合、素子同士の正確なアラインメント調整が要求され、光渦の位相特異

点を重ね合わせることが困難であった。したがって、今後、アラインメントフリーな光渦多重技術の開発が重要になると考えられる。

q -plate に関する先行研究において、 q -plate とコレステリック液晶と組み合わせた液晶積層構造を用いて素子同士のアラインメント調整なしに光渦のトポロジカルチャージを二倍に増大する手法が提案された^[21]。この手法では、コレステリック液晶の円偏光選択反射特性を利用して q -plate で生成された純粋な円偏光の光渦を反射させ、その反射光を再び q -plate へ伝搬させることで、トポロジカルチャージが二倍に増大した光渦が得られる。このとき、入射光と反射光は同軸であるため、素子同士のアラインメントフリーが達成される。そこで本研究では、 q -plate と同様の幾何学構造を有するパターン配向したネマティック液晶素子と一様配向したコレステリック液晶素子を組み合わせた液晶積層構造を提案し、同軸光線上に 2 倍異なるトポロジカルチャージを有する光渦の生成が可能であることを実証した。本研究で開発したデバイスは光渦の位相特異点が完全に一致した円偏光の光渦をアラインメントフリーで生成できるため、光渦の多重化技術の一つとしてその応用が期待される。

2.2 動作原理

2.2.1 提案素子

素子構造

図 2.1 に提案素子の構造を示す。図 2.1(a)および(b)は、それぞれパターン配向したネマティック液晶素子と一様配向したコレステリック液晶素子における液晶配向状態を表し、図 2.1(c)は提案する液晶積層構造を示す。ここで、座標軸は右手系を考え、素子の基板面を xy 平面とし、素子の厚さ方向を z 軸方向と定義した。

(a) パターン配向したネマティック液晶素子

基板に塗布した光配向膜とネマティック液晶層から成り、基板界面における液晶の配向方位分布は中心の点周りで $\pm m\pi$ ラジアン回転している。バルク中の配向状態は、厚さ方向に一様で基板界面の配向分布に応じた方位角分布を有する。本研究では、液晶の配向方位角分布を $+\pi$ ラジアンの回転とした。

(b) 一様配向したコレステリック液晶素子

配向容易軸方位が一様な水平配向膜とコレステリック液晶層から成り、基板界面におけるコレステリック液晶の配向方向は配向膜に沿って一様に配向している。バルク中の配向状態は、厚さ方向に自己組織的な螺旋構造を有する。本研究では、コレステリック液晶の螺旋の向きは右巻きとした。

(c) 提案素子

パターン配向したネマティック液晶素子と一様配向したコレステリック液晶素子を積層した構造を有する。パターン配向したネマティック液晶素子側から、円偏光を入射することで動作する。

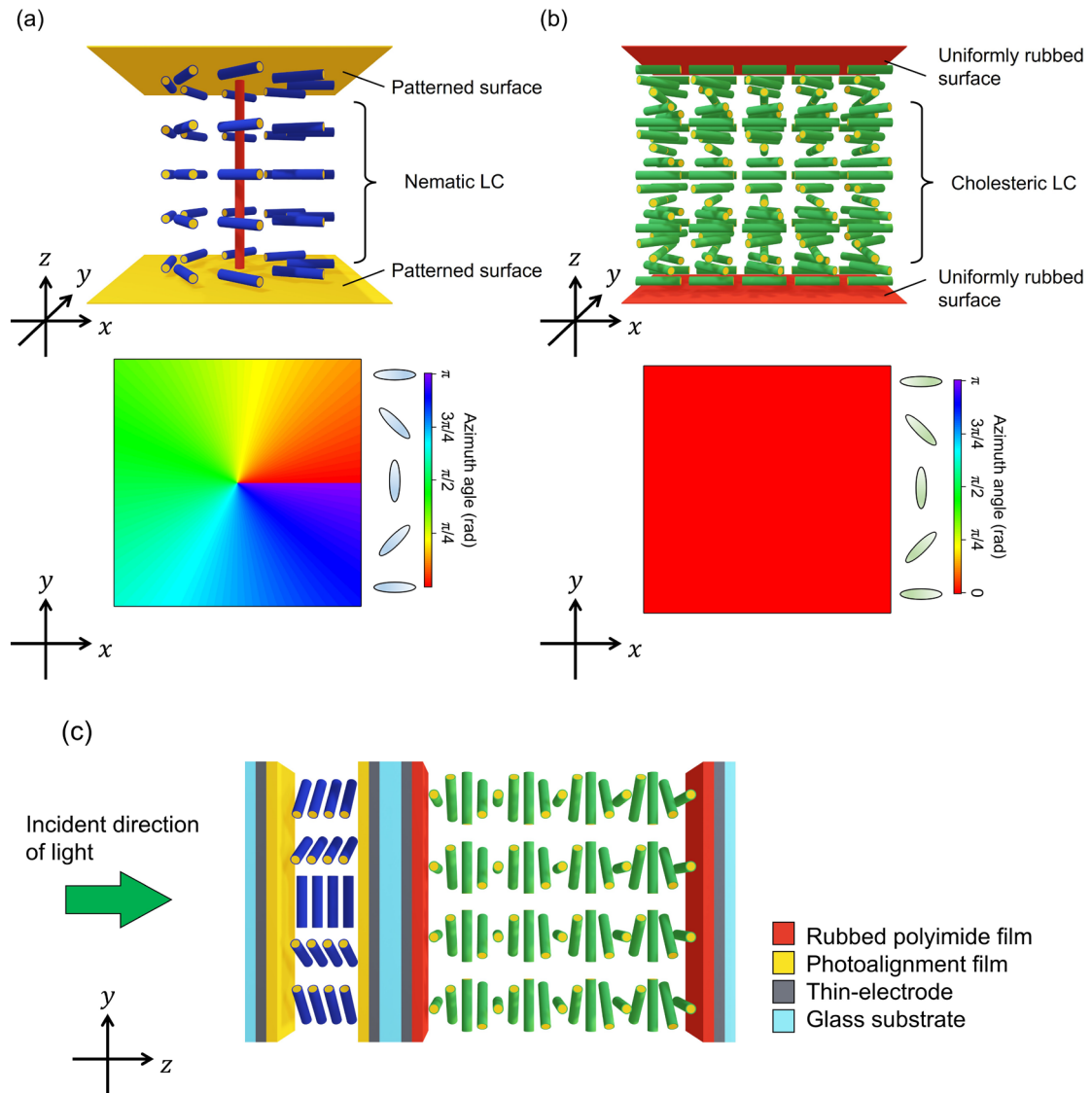


図 2.1 提案素子の構造：(a) パターン配向したネマティック液晶素子および(b) 一様配向したコレステリック液晶素子の液晶配向状態、(c) 液晶積層構造

動作原理

図 2.2 に提案素子の動作原理を示す。素子に左円偏光を入射すると、反射光の円偏光成分に 2 倍異なるトポロジカルチャージを有する光渦が生成される。以下に、その動作原理を説明する。ここでまず、(a) パターン配向したネマティック液晶素子および (b) 一様配向したコレステリック液晶素子の動作を説明し、その後、(c) 提案素子の動作を説明する。

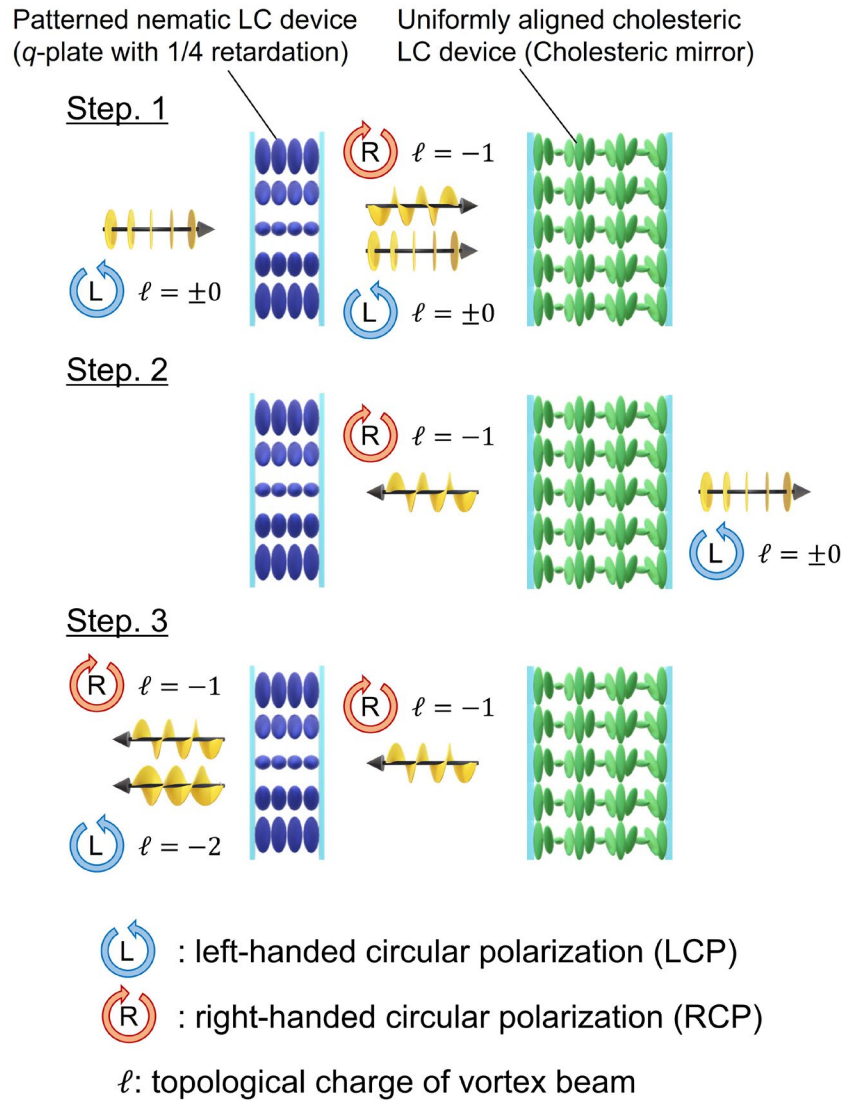


図 2.2 提案素子の動作原理

(a) パターン配向したネマティック液晶素子

一次元光伝搬解析法であるジョーンズマトリックス法によれば、パターン配向したネマティック液晶素子に円偏光を入射した際の透過光 \mathbf{E}_{out} は次式で表される^[16, 30, 32]。

$$\mathbf{E}_{\text{out}} = \cos\left(\frac{\Gamma}{2}\right) \begin{bmatrix} 1 \\ \pm j \end{bmatrix} - j \sin\left(\frac{\Gamma}{2}\right) \exp(\pm j 2\theta_{\text{NLC}}) \begin{bmatrix} 1 \\ \mp j \end{bmatrix}$$

ここで、 $\Gamma = 2\pi\Delta n d/\lambda$ は液晶のリタデーションを意味し、 Δn は液晶の複屈折率、 d は液晶層の厚さ、 λ は入射波長、 θ_{NLC} は液晶の配向方位角を表す。透過光は入射円偏光と同じ向きの円偏光成分と逆向きの円偏光成分を持つ。これらの偏光変換の割合は液晶のリタデーションで決まる。さらに、入射円偏光と逆向きの円偏光成分（偏光変換した円偏光成分）には、液晶の配向方位角に対して2倍の絶対位相が付与される。

液晶の配向方位に対して付与される絶対位相は、ベリー位相（Pancharatnam-Berry phase）または幾何学位相（geometric phase）と呼ばれる。液晶の配向方位角0から π ラジアンの変化に対して、ベリー位相は0から 2π ラジアンまで変化し、一波長分の位相変調が生じる。したがって、液晶の配向方位が中心点周りに π ラジアン回転した構造の場合、透過光の位相分布は中心点周りに 2π ラジアン回転し、螺旋状の波面をもつ光渦が生成される。

絶対位相の符号は入射円偏光の向きに対応する。液晶の配向方位分布が正回転の場合、ベリー位相の符号は左円偏光および右円偏光入射のとき、それぞれ負および正となる。液晶の配向方位分布が負回転の場合は、これらが逆転する。

このデバイスは、一般に *q*-plate と呼ばれ、液晶のリタデーションを電氣的に調整することで完全な円偏光の光渦を生成できる素子として知られている^[12, 98]。通常、完全な円偏光光渦を得るために1/2波長リタデーションの条件で使用されるが、提案素子では1/4波長リタデーションの条件を使用し、透過光の円偏光成分をそれぞれ50%に偏光分離させることで同軸光線上に異なる光渦生成が可能となる。

(b) 一様配向したコレステリック液晶素子

コレステリック液晶は、バルク内で自己組織的な螺旋構造を示し、一次元フォトニック結晶と考えることができ、この螺旋構造に基づいて円偏光を反射する。反射帯域 $\Delta\lambda$ は液晶材料の複屈折 Δn と螺旋ピッチ p によって決定され、次式で与えられる。

$$\Delta\lambda = \Delta n p$$

コレステリック液晶の円偏光選択反射特性はフォトニックバンド理論によって詳細に説明されるが、簡単に Bragg の条件からも説明できる^[100]。本項では、右巻きの螺旋構造を有するコレステリック液晶について考える。

(c) 提案素子（液晶積層構造）

ネマティック液晶の配向方位分布が正回転で、コレステリック液晶の螺旋の向きは右巻きとする。

Step 1：パターン配向したネマティック液晶素子（一度目）

パターン配向したネマティック液晶素子に左円偏光が入射した場合、透過光は同軸光線上で左円偏光および右円偏光に偏光分離し、透過率の円偏光成分はそれぞれ 50% となる。左円偏光成分にはベリー位相が付与されず、そのまま平面波として伝搬する。一方で、右円偏光成分にはベリー位相が付与され、光渦として伝搬する。このときのベリー位相の位相変調量は -2π ラジアンであり、光渦のトポロジカルチャージは -1 となる。これらの円偏光成分が一様配向したコレステリック液晶に入射する。

Step 2：一様配向したコレステリック液晶素子

一様配向したコレステリック液晶素子は右円偏光成分を反射し、左円偏光成分を透過する。つまり、光渦は反射され、平面波は透過して除去される。反射した光渦は再びパターン配向したネマティック液晶素子に入射する。

Step 3：パターン配向したネマティック液晶素子（二度目）

パターン配向したネマティック液晶素子に入射した右円偏光光渦は、左右円偏光成分に偏光分離し、それらの透過率は 25% となる。左円偏光成分には新たにベリー位相が付与され、左円偏光成分はトポロジカルチャージ -2 の光渦、右円偏光成分はトポロジカルチャージ -1 の光渦として伝搬する。このとき、ネマティック液晶の配向方位角分布が負回転となっていることに注意する。伝搬光はパターン配向したネマティック液晶素子中を一度目と全く同じ光路を通るため、同軸光線上に異なるトポロジカルチャージを有する光渦が生成できる。

2.2.2 光伝搬解析

ジョーンズマトリックス法

提案素子の動作原理を数値的に明らかとするために、ジョーンズマトリックス法を用いて光学特性を評価した。①伝搬光は $+z$ 方向に進行し、まずパターン配向したネマティック液晶素子に垂直入射する。②その後、一様配向したコレステリック液晶素子において右円偏光成分は透過し、左円偏光成分は反射される。③反射した左円偏光は、 $-z$ 方向からパターン配向したネマティック液晶素子に垂直入射する。以下に、①から③の各素子における光伝搬を示す。ここでは、伝搬光の進行方向 $+z$ および $-z$ 方向に対して、各伝搬マトリックスにそれぞれ右上付き演算子 $+$ および $-$ を付けることとする。

① パターン配向したネマティック液晶素子（一度目）

パターン配向したネマティック液晶素子の伝搬マトリックス $\mathbf{M}_{\text{NLC}}^+$ は、次で表される。

$$\mathbf{M}_{\text{NLC}}^+(\Gamma, \theta_{\text{NLC}}) = \cos\left(\frac{\Gamma}{2}\right) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - j \sin\left(\frac{\Gamma}{2}\right) \begin{bmatrix} \cos(2\theta_{\text{NLC}}) & \sin(2\theta_{\text{NLC}}) \\ \sin(2\theta_{\text{NLC}}) & -\cos(2\theta_{\text{NLC}}) \end{bmatrix}$$

ここで、 $\Gamma = 2\pi\Delta n d/\lambda$ は液晶層のリタデーション、 Δn はネマティック液晶の複屈折率、 d は液晶層の厚さ、 λ は入射波長を表し、 θ_{NLC} はネマティック液晶の配向容易軸方位を表す。素子が $1/4$ 波長リタデーションを有する場合、 $\cos(\Gamma/2) = \sin(\Gamma/2) = 1/\sqrt{2}$ となり、次のようになる。

$$\mathbf{M}_{\text{NLC}}^+(\theta_{\text{NLC}}) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - j \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos(2\theta_{\text{NLC}}) & \sin(2\theta_{\text{NLC}}) \\ \sin(2\theta_{\text{NLC}}) & -\cos(2\theta_{\text{NLC}}) \end{bmatrix}$$

パターン配向したネマティック液晶素子に右円偏光 $\mathbf{E}_{\text{in}}^+ = (1/\sqrt{2})[1 \ j]^T$ を入射すると、透過光 $\mathbf{E}_{\text{out_NLC}}^+(\theta_{\text{NLC}})$ は次のように表される。なお、右上付き文字 T は転置行列を意味する。

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{\text{out_NLC}}^+(\theta_{\text{NLC}}) &= \mathbf{M}_{\text{NLC}}^+(\theta_{\text{NLC}}) \mathbf{E}_{\text{in}}^+ \\ \mathbf{E}_{\text{out_NLC}}^+(\theta_{\text{NLC}}) &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix} - j \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \cos(2\theta_{\text{NLC}}) + j \sin(2\theta_{\text{NLC}}) \\ \sin(2\theta_{\text{NLC}}) - j \cos(2\theta_{\text{NLC}}) \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix} - j \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \cos(2\theta_{\text{NLC}}) + j \sin(2\theta_{\text{NLC}}) \\ -j\{\cos(2\theta_{\text{NLC}}) + j \sin(2\theta_{\text{NLC}})\} \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix} - j \frac{1}{2} \exp(j2\theta_{\text{NLC}}) \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix} \\ \mathbf{E}_{\text{out_NLC}}^+(\theta_{\text{NLC}}) &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix} - j \frac{1}{2} \exp(j2\theta_{\text{NLC}}) \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix} \end{aligned}$$

したがって、出射光は右円偏光成分と左円偏光成分に偏光分離され、それぞれ透過率 50% となる。さらに、入射右円偏光から偏光変化した左円偏光成分には絶対位相としてのベリー位相が付与される。

② 一様配向したコレステリック液晶素子

一様配向したコレステリック液晶素子の伝搬マトリックス $\mathbf{M}_{l\text{-CLC}}^{\pm}$ は、次で表される。

$$\mathbf{M}_{l\text{-CLC}}^{\pm} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \mp j \\ \pm j & 1 \end{bmatrix}$$

よって、一様配向したコレステリック液晶素子の透過光 $\mathbf{E}_{\text{out_CLC}}^{+}(\theta_{\text{NLC}})$ および反射光 $\mathbf{E}_{\text{out_CLC}}^{-}(\theta_{\text{NLC}})$ は以下になる。

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{\text{out_CLC}}^{+}(\theta_{\text{NLC}}) &= \mathbf{M}_{l\text{-CLC}}^{+} \mathbf{E}_{\text{out_NLC}}(\theta_{\text{NLC}}) \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix} \\ \mathbf{E}_{\text{out_CLC}}^{-}(\theta_{\text{NLC}}) &= \mathbf{M}_{l\text{-CLC}}^{-} \mathbf{E}_{\text{out_NLC}}(\theta_{\text{NLC}}) \\ &= -j \frac{1}{2} \exp(j2\theta_{\text{NLC}}) \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix} \end{aligned}$$

したがって、一様配向したコレステリック液晶素子では、右円偏光成分は透過し、左円偏光成分は反射される。左円偏光成分には、パターン配向したネマティック液晶素子を伝搬する際に付与されたベリー位相が含まれている。反射光は再びパターン配向したネマティック液晶素子を伝搬する。

③ パターン配向したネマティック液晶素子（二度目）

再びパターン配向したネマティック液晶素子の伝搬マトリックス $\mathbf{M}_{\text{NLC}}^{-}$ は、伝搬光の進行方向が $-z$ 方向となるため、ネマティック液晶の配向容易軸方位は $\pi - \theta_{\text{NLC}}$ と定義され、次のようになる。

$$\mathbf{M}_{\text{NLC}}^{-}(\pi - \theta_{\text{NLC}}) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - j \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos(2\theta_{\text{NLC}}) & -\sin(2\theta_{\text{NLC}}) \\ -\sin(2\theta_{\text{NLC}}) & -\cos(2\theta_{\text{NLC}}) \end{bmatrix}$$

コレステリック液晶素子から反射した光は、パターン配向したネマティック液晶素子を一度目と同じ光路上を伝搬することとなる。よって、提案素子が反射する光 $\mathbf{E}_{\text{out_NLC}}^{-}(\theta_{\text{NLC}})$ は、次のようになる。

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{\text{out_NLC}}^{-}(\theta_{\text{NLC}}) &= \mathbf{M}_{\text{NLC}}^{-}(\pi - \theta_{\text{NLC}}) \mathbf{E}_{\text{out_CLC}}^{-}(\theta_{\text{NLC}}) \\ &= -j \frac{1}{2\sqrt{2}} \exp(j2\theta_{\text{NLC}}) \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix} + j \frac{1}{2\sqrt{2}} \exp(j4\theta_{\text{NLC}}) \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix} \end{aligned}$$

反射光の左円偏光成分にはネマティック液晶の配向容易軸に対して2倍の位相変調が生じ、右円偏光成分には4倍の位相変調が生じる。すなわち、これは左右円偏光成分で2倍異なるベリー位相が付与されることを意味する。

したがって、提案素子は左右円偏光で2倍異なるベリー位相が付与された光を反射する。また、左右円偏光成分の反射率はそれぞれ25%となる。

4×4 マトリックス法

提案素子の動作を確認するために、4×4 マトリックス法を用いて素子の光伝搬特性を解析した。図 2.3 に数値解析モデルを示す。解析モデルは、(a) パターン配向したネマティック液晶素子のみで構成される単層構造と (b) パターン配向したネマティック液晶素子および一様配向したコレステリック液晶素子から成る積層構造の 2 種類とした。さらに本解析では、パターン配向したネマティック液晶の配向容易軸のある点周りの回転角度の符号が正および負の場合、コレステリック液晶の螺旋方向が右巻きおよび左巻きの場合について調査し、それぞれの素子設計・条件における伝搬光を明らかにした。

表 2.1 に解析パラメーターを示す。解析では、伝搬軸+z 方向に進む波長 550 nm の円偏光を素子に垂直入射し、その伝搬光についてネマティック液晶の配向容易軸方位依存性を調査した。ネマティック液晶層のリタデーションは 1/4 波長とし、複屈折率 $\Delta n = 0.2$ 、膜厚 $d_{\text{NLC}} = 688 \text{ nm}$ とした。ネマティック液晶の配向容易軸方位 θ_{NLC} は 0 rad から $\pi \text{ rad}$ まで、および 0 rad から $-\pi \text{ rad}$ までの範囲で変化させた。コレステリック液晶は複屈折率 $\Delta n = 0.1$ 、螺旋ピッチ $d_{\text{CLC}} = \pm 355 \text{ nm}$ とし、膜厚 $d_{\text{CLC}} = 7097 \text{ nm}$ で螺旋数 10 とした。コレステリック液晶の配向容易軸方位は、 $\theta_{\text{CLC}} = 0 \text{ rad}$ で固定とした。螺旋ピッチは $p = \pm 355 \text{ nm}$ とした。符号は螺旋の向きを表し、正は右巻き、負は左巻きを意味する。ガラス基板とネマティック液晶の境界位置を $z = 0$ とした。

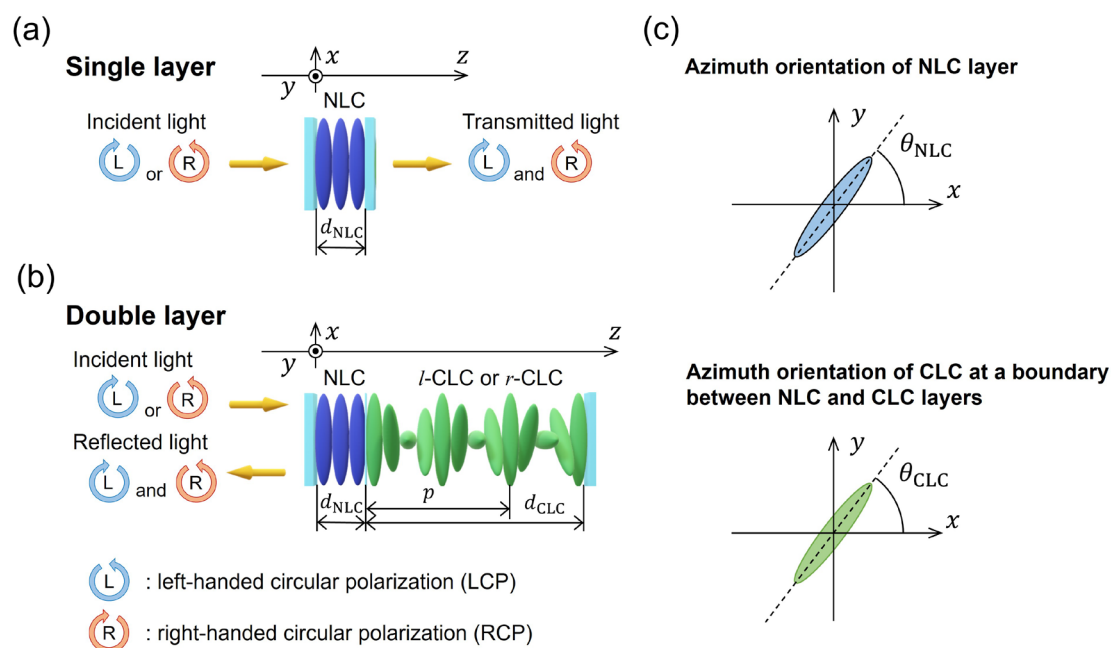


図 2.3 4×4 マトリックス法を用いた数値解析モデル：(a) 単層構造、(b) 積層構造

表 2.1 4×4 マトリックス法による数値解析に用いた素子パラメーター

液晶層	ネマティック液晶 (NLC)	コレステリック液晶 (CLC)
複屈折率 Δn	0.2	0.1
常光屈折率 n_o	1.5	1.5
異常光屈折率 n_e	1.7	1.6
膜厚 $d_{\text{NLC}}, d_{\text{CLC}}$	688 nm	7097 nm
螺旋ピッチ p		± 355 nm
配向容易軸方位 $\theta_{\text{NLC}}, \theta_{\text{CLC}}$	正回転：0 から π rad まで 負回転：0 から $-\pi$ rad まで	0 rad
入射円偏光	左円偏光 (LCP) および右円偏光 (RCP)	
入射波長	550 nm	
初期位相	0 rad	

(a) 単層構造

a-1. ネマティック液晶の配向方位：正回転

単層構造において、ネマティック液晶の配向方位の回転方向を正とした時の光伝搬解析の結果を示す。図 2.4 に透過率の配向方位依存性を示す。図 2.4 (a)および(b)は、それぞれ左円偏光入射および右円偏光入射時の透過率を示す。透過率の円偏光成分は、左右どちらも 50%であった。ネマティック液晶層のリタデーションは、目的波長 550nm において 1/4 波長に設定した。このため、入射円偏光はネマティック液晶層を通過するとちょうど直線偏光に偏光変換される。直線偏光は、振幅が等しい左右円偏光成分の重ね合わせとして記述される。したがって、単層構造に円偏光を入射すると、その透過率の左右円偏光成分はそれぞれ 50%となることが分かった。

図 2.5 に透過位相の配向方位依存性を示す。図 2.5(a)および(b)は、それぞれ左円偏光入射および右円偏光入射時の透過率を示す。左円偏光入射時は、透過左円偏光の位相は配向方位に依存せず一定、透過右円偏光の位相は配向方位に対して 2 倍の負の傾きで線形に変化した。右円偏光入射時は、透過左円偏光の位相は配向方位に対して 2 倍の正の傾きで線形に変化し、透過右円偏光の位相は配向方位に依存せず一定であった。この結果から、ネマティック液晶層を通過することで偏光変化した円偏光成分にベリー位相が付与されたことが分かった。入射円偏光によってベリー位相の符号が異なることが分かった。

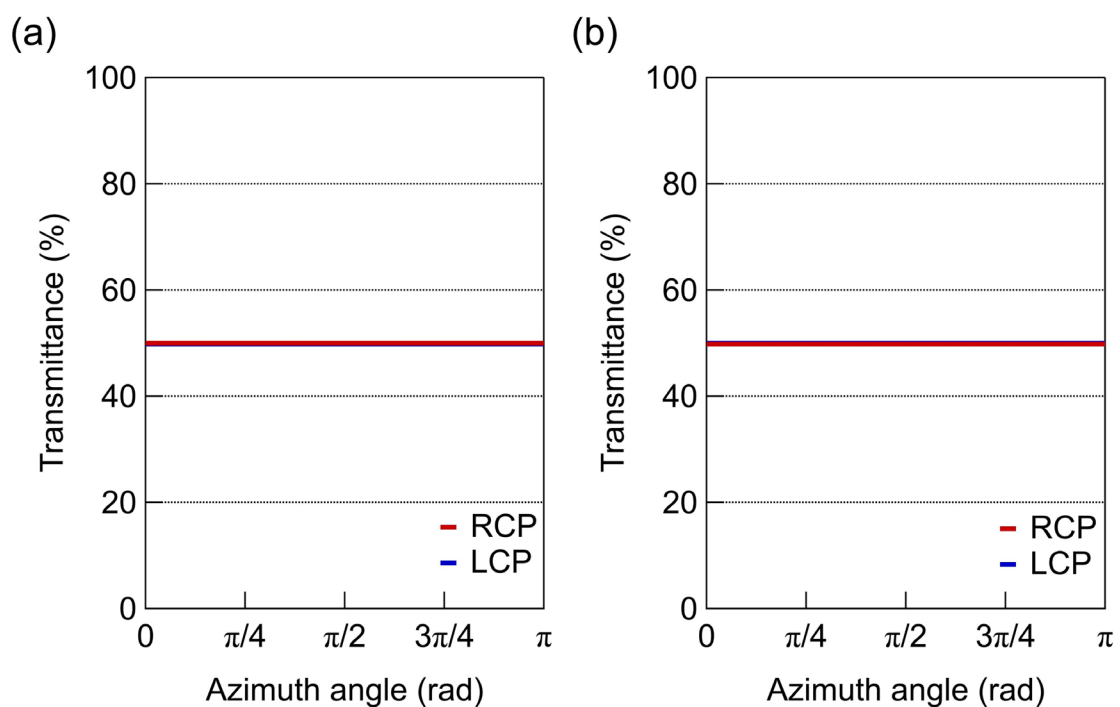


図 2.4 単層構造における透過率の配向方位依存性：(a) 左円偏光入射、(b) 右円偏光入射)

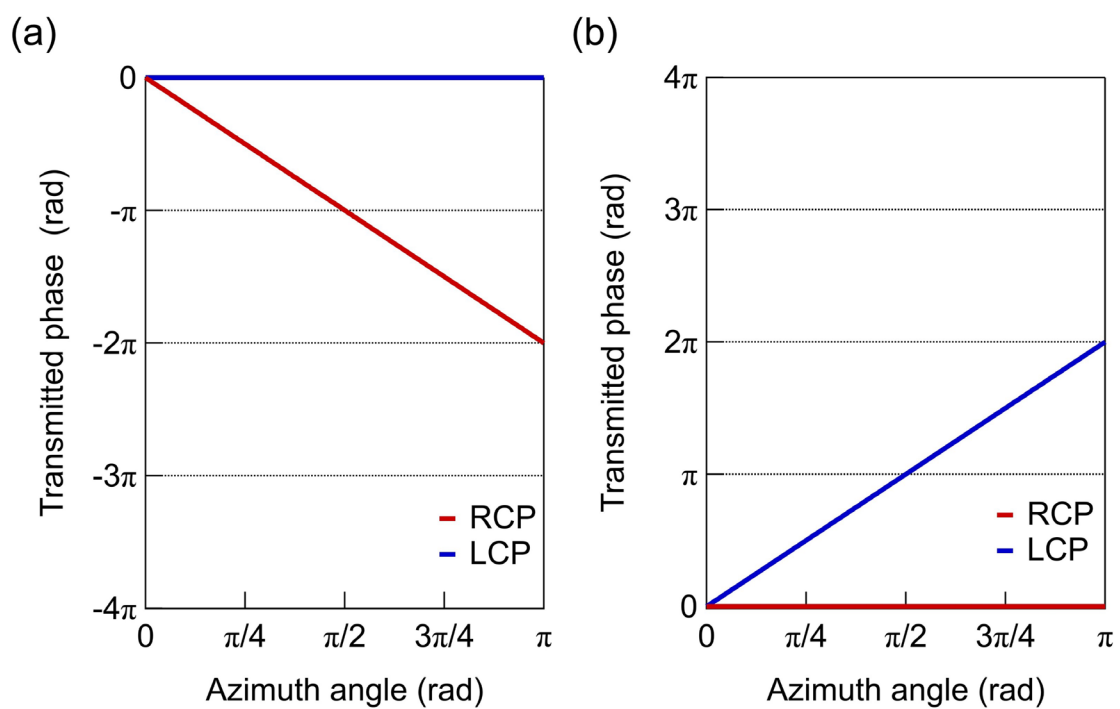


図 2.5 単層構造における透過位相の配向方位依存性：(a) 左円偏光入射、(b) 右円偏光入射

a-2. ネマティック液晶の配向容易軸方位：負回転

単層構造において、ネマティック液晶の配向方位の回転方向を負とした時の光伝搬解析の結果を示す。図 2.6 に透過率の配向方位依存性を示す。図 2.6 (a)および(b)は、それぞれ左円偏光入射および右円偏光入射時の透過率を示す。ネマティック液晶の配向方位の回転方向を正とした時の解析結果と同様に（図 2.4）、単層構造に円偏光を入射するとその透過率の左右円偏光成分はそれぞれ 50% となることが分かった。

図 2.7 に透過位相の配向方位依存性を示す。図 2.7(a)および(b)は、それぞれ左円偏光入射および右円偏光入射時の透過率を示す。左円偏光入射時は、透過左円偏光の位相は配向方位に依存せず一定、透過右円偏光の位相は配向方位に対して 2 倍の負の傾きで線形に変化した。右円偏光入射時は、透過左円偏光の位相は配向方位に対して 2 倍の正の傾きで線形に変化し、透過右円偏光の位相は配向方位に依存せず一定であった。この結果から、ネマティック液晶の配向方位の回転方向を正とした時の解析結果と同様に（図 2.5）、偏光変換した円偏光成分にベリー位相が付与されたことが分かった。入射円偏光によってベリー位相の符号が異なることが分かった。ネマティック液晶の配向方位の回転方向を正および負とした時の解析結果を比較すると、ベリー位相の符号はそれぞれ対称の関係であった。したがって、ベリー位相の符号は、入射円偏光およびネマティック液晶の配向方位の回転方向によって決まることが分かった。

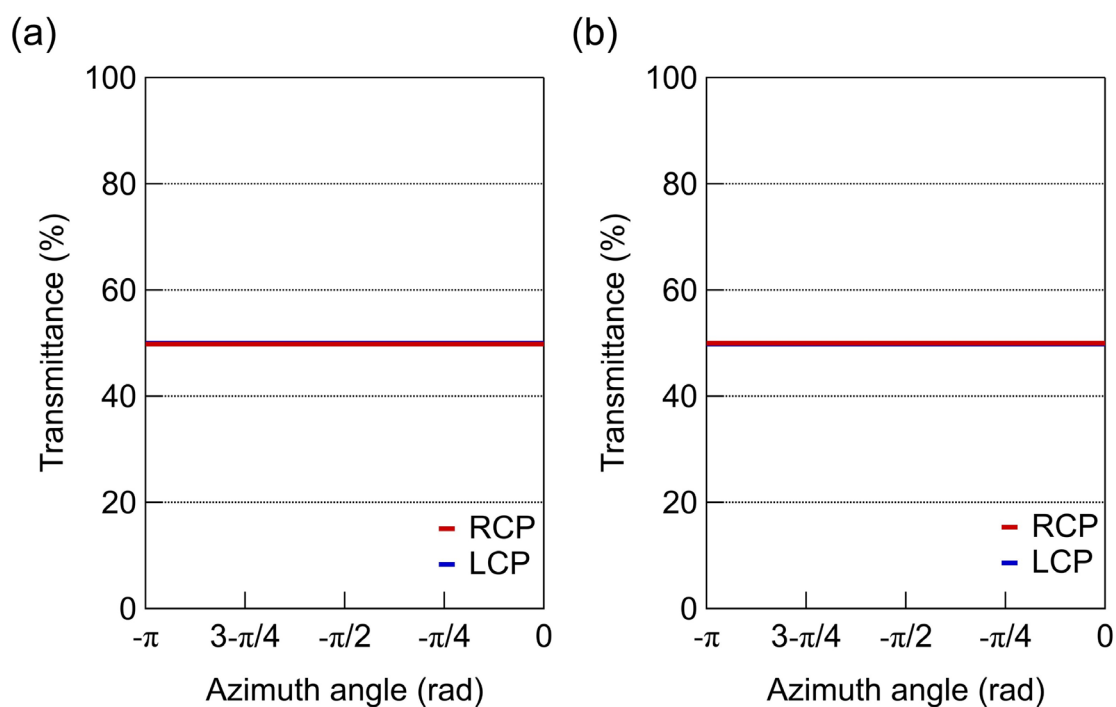


図 2.6 単層構造における透過率の配向方位依存性：(a) 左円偏光入射、(b) 右円偏光入射

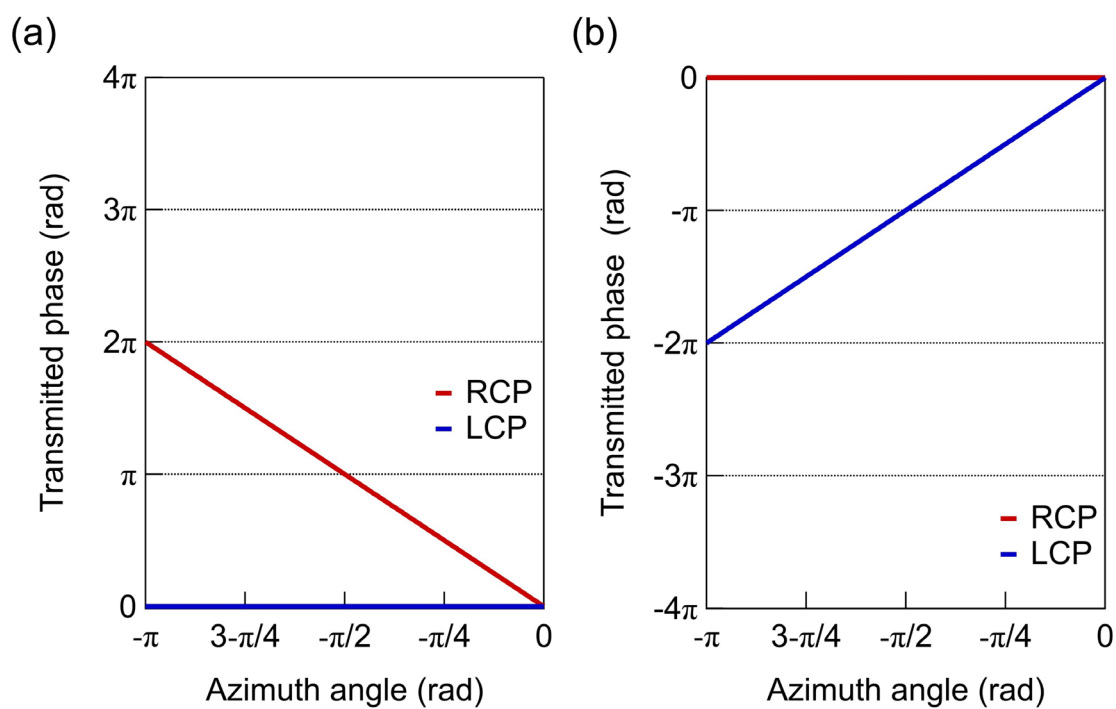


図 2.7 単層構造における透過位相の配向方位依存性：(a) 左円偏光入射、(b) 右円偏光入射

(b) 積層構造

b-1. コレステリック液晶の螺旋の向き：左巻き

ネマティック液晶の配向分布を正回転とし、コレステリック液晶の螺旋の向きを左巻きとした時の光伝搬解析の結果を示す。図 2.8 に反射率の配向方位依存性を示す。図 2.8(a)および(b)は、それぞれ左円偏光および右円偏光入射時の反射率を示す。反射率の左右円偏光成分は入射偏光に依存せず、全て約 25%になることが分かった。反射率は配向方位に対して $\pm 5\%$ 以下で振動することが分かった。これは、ネマティック液晶とコレステリック液晶の間で生じる屈折率の不整合が原因であると考えられる。これは、液晶材料と基板の屈折率を整合させることで抑制できると考えられる。

図 2.9 に反射位相の配向方位依存性を示す。図 2.9(a)および(b)は、それぞれ左円偏光および右円偏光入射時の反射位相を示す。左円偏光入射時は、反射左円偏光の位相は配向方位に依存せず一定、透過右円偏光の位相は配向方位に対して+2 倍の傾きで線形に変化した。右円偏光入射時は、透過左円偏光の位相は配向方位に対して+2 倍の傾きで線形に変化し、透過右円偏光の位相は配向方位に対して+4 倍の傾きで線形に変化した。

図 2.10 に透過率の配向方位依存性を示す。図 2.10(a)および(b)は、それぞれ左円偏光および右円偏光入射時の透過率を示す。透過率の左円偏光成分および右円偏光成分は、入射円偏光に依らず、それぞれ約 0%および約 50%で、明らかなコレステリック液晶の選択反射特性が得られた。また、透過率においても $\pm 5\%$ 以下の振動が確認された。これは反射率で生じた振動と同様に液晶層間の屈折率不整合に依って生じたと考えられ、屈折率の整合によって抑制できると考えられる。

図 2.11 に透過位相の配向方位依存性を示す。図 2.11(a)および(b)は、それぞれ左円偏光および右円偏光入射時の透過位相を示す。左円偏光入射時は、透過左円偏光の位相は配向方位に依存せず一定、透過右円偏光の位相は配向方位に対して+2 倍の傾きで線形に変化した。右円偏光入射時は、透過左円偏光の位相は配向方位に対して+2 倍の傾きで線形に変化し、透過右円偏光の位相は配向方位に対して+4 倍の傾きで線形に変化した。

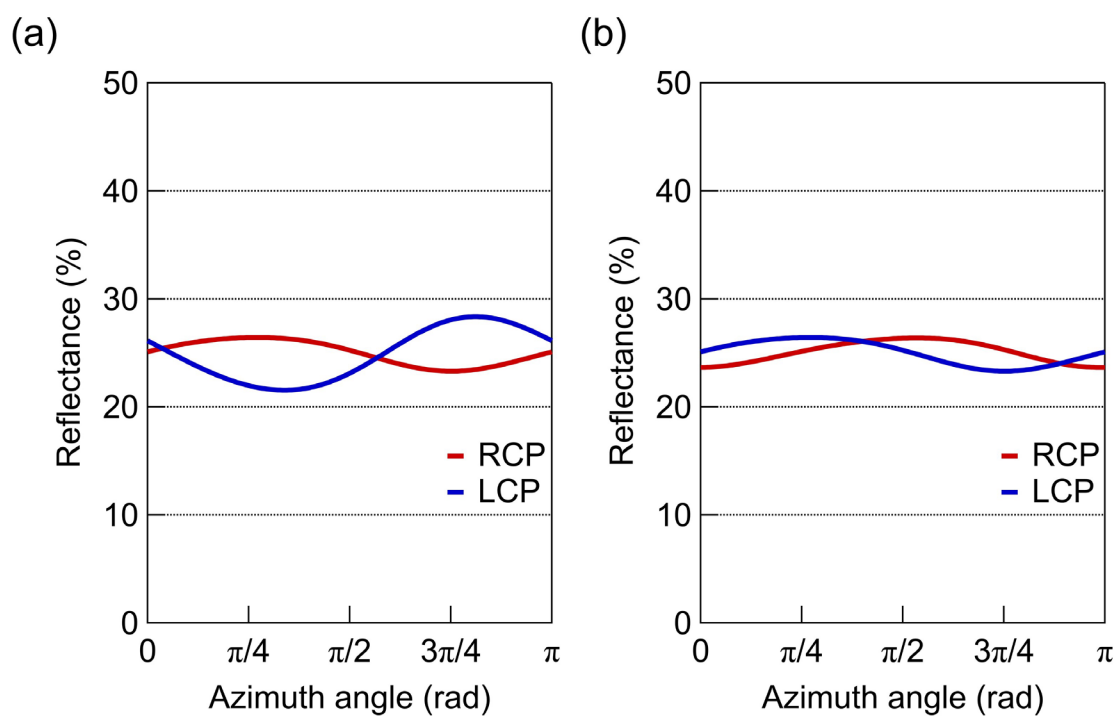


図 2.8 反射率の配向方位依存性：(a) 左円偏光入射、(b) 右円偏光入射

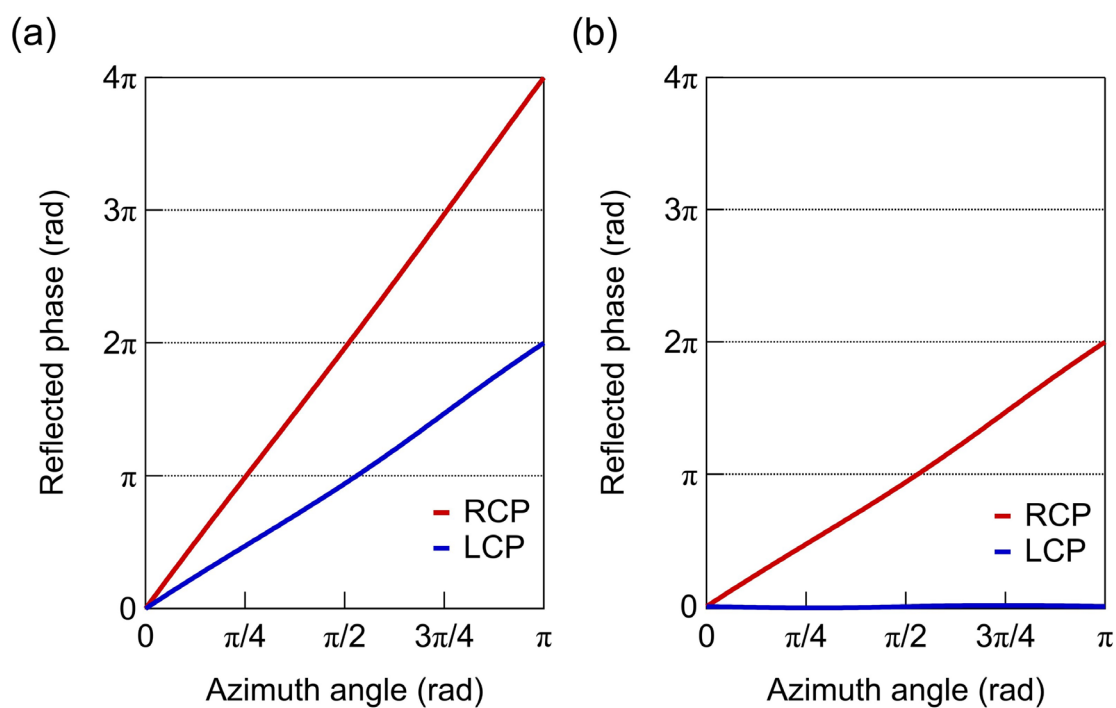


図 2.9 反射位相の配向方位依存性：(a) 左円偏光入射、(b) 右円偏光入射

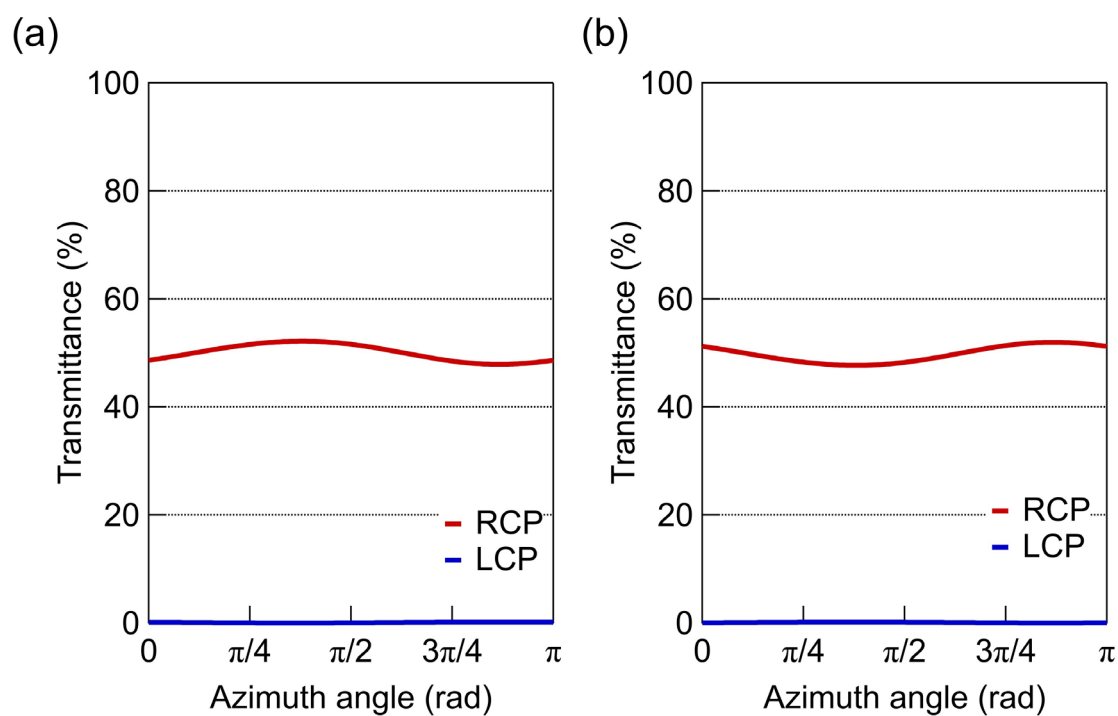


図 2.10 透過率の配向方位依存性：(a) 左円偏光入射、(b) 右円偏光入射

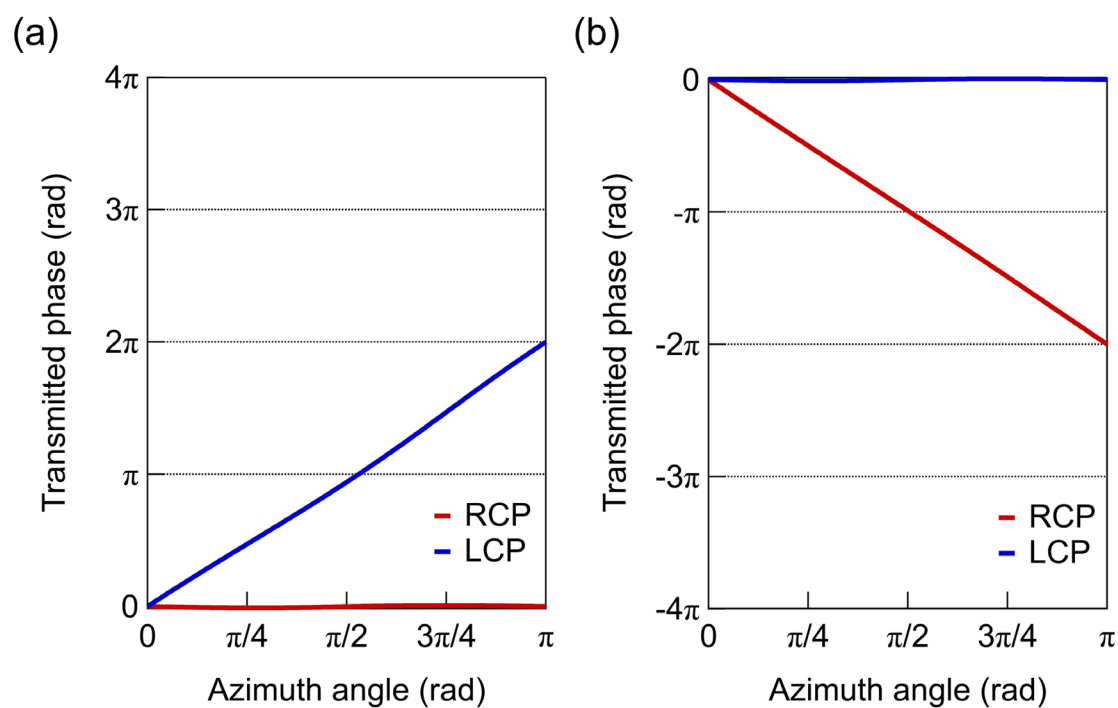


図 2.11 透過位相の配向方位依存性：(a) 左円偏光入射、(b) 右円偏光入射

b-2. コレステリック液晶の螺旋の向き：右巻き

ネマティック液晶の配向分布を正回転とし、コレステリック液晶の螺旋の向きを右巻きとした時の光伝搬解析の結果を示す。図 2.12 に反射率の配向方位依存性を示す。図 2.12 (a) および (b) は、ネマティック液晶の配向方位の回転を正とし、入射偏光をそれぞれ左円偏光および右円偏光としたときの反射率を示す。

図 2.13 に反射位相の配向方位依存性を示す。図 2.13 (a) および (b) は、ネマティック液晶の配向方位の回転を正とし、入射偏光をそれぞれ左円偏光および右円偏光としたときの反射位相を示す。左円偏光入射時は、透過左円偏光の位相は配向方位に対して -4 倍の傾きで線形に変化し、透過右円偏光の位相は配向方位に対して -2 倍の傾きで線形に変化した。右円偏光入射時は、透過左円偏光の位相は配向方位に対して -2 倍の傾きで線形に変化し、透過右円偏光の位相は配向方位に依存せず一定であった。

図 2.14 に透過率の配向方位依存性を示す。図 2.14 (a) および (b) は、それぞれ左円偏光および右円偏光入射時の透過率を示す。透過率の左円偏光成分および右円偏光成分は、入射円偏光に依らず、それぞれ約 0% および約 50% で、明らかなコレステリック液晶の選択反射特性が得られた。また、透過率においても $\pm 5\%$ 以下の振動が確認された。これは反射率で生じた振動と同様に液晶層間の屈折率不整合に依って生じたと考えられ、屈折率の整合によって抑制できると考えられる。

図 2.15 に透過位相の配向方位依存性を示す。図 2.15 (a) および (b) は、それぞれ左円偏光および右円偏光入射時の透過位相を示す。左円偏光入射時は、透過左円偏光の位相は配向方位に依存せず一定、透過右円偏光の位相は配向方位に対して $+2$ 倍の傾きで線形に変化した。右円偏光入射時は、透過左円偏光の位相は配向方位に対して $+2$ 倍の傾きで線形に変化し、透過右円偏光の位相は配向方位に対して $+4$ 倍の傾きで線形に変化した。

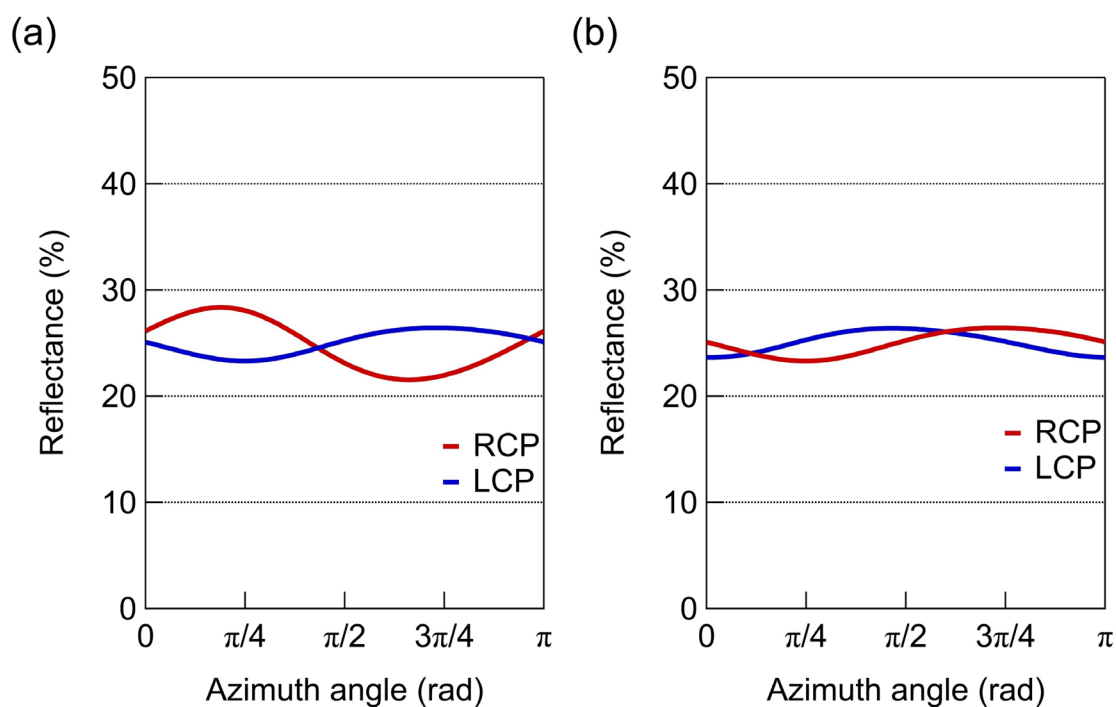


図 2.12 反射率の配向方位依存性：(a) 左円偏光入射、(b) 右円偏光入射

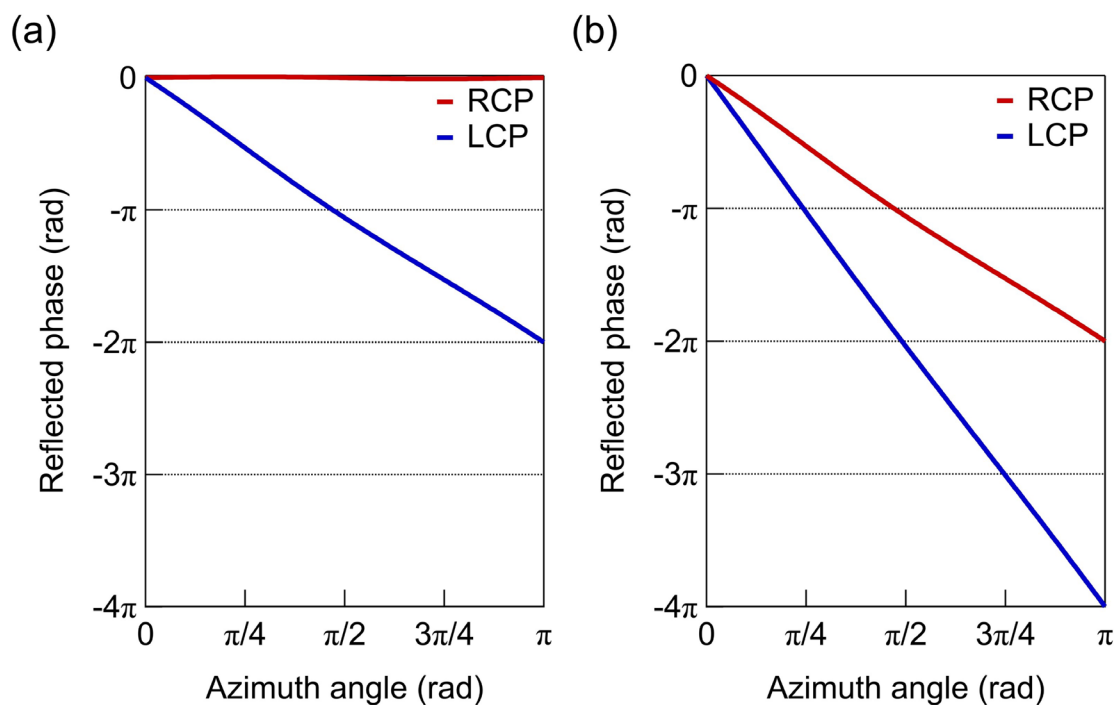


図 2.13 反射位相の配向方位依存性：(a) 左円偏光入射、(b) 右円偏光入射

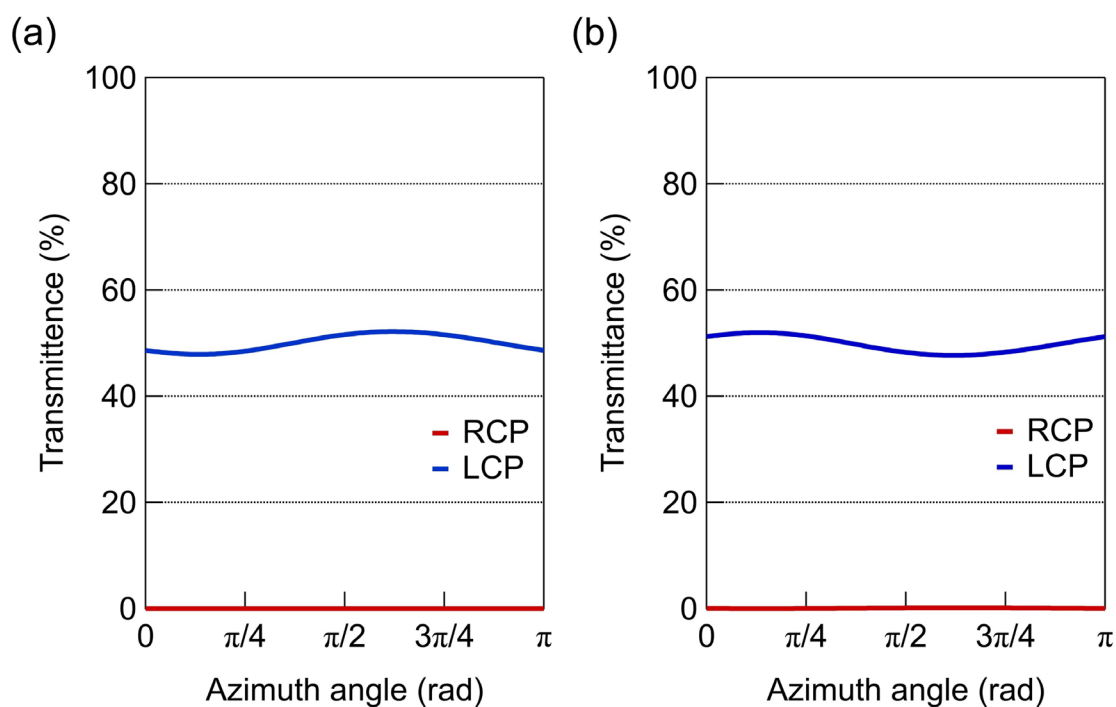


図 2.14 透過率の配向方位依存性：(a) 左円偏光入射、(b) 右円偏光入射

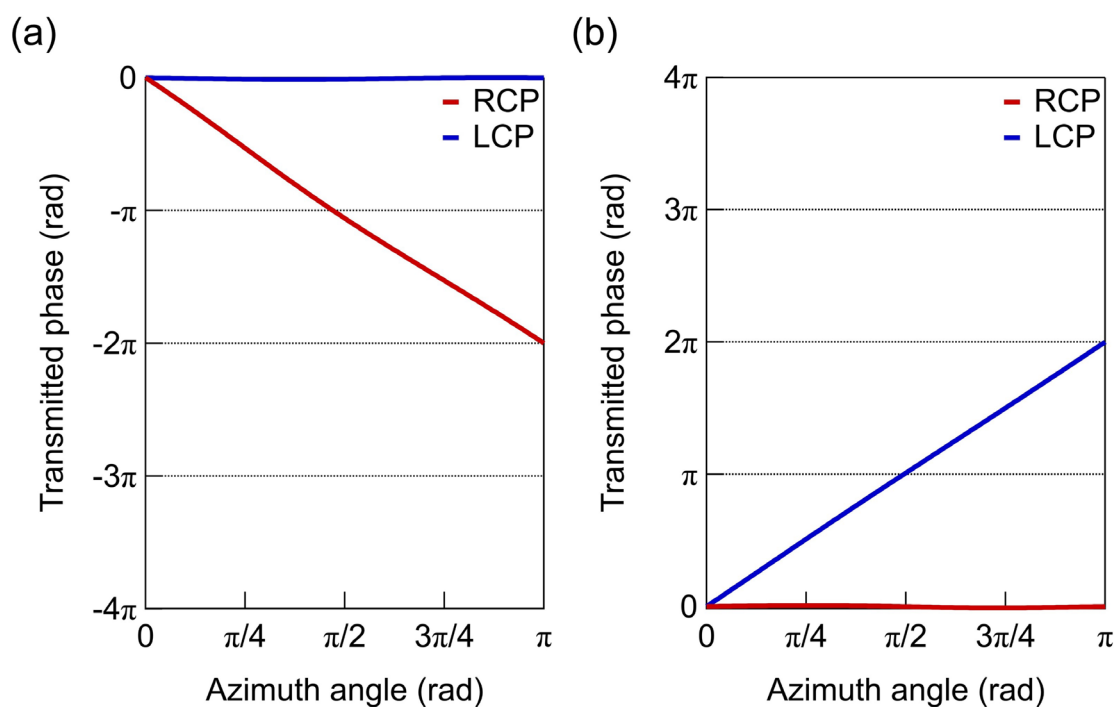


図 2.15 透過位相の配向方位依存性：(a) 左円偏光入射、(b) 右円偏光入射

表 2.2 に、各素子構造における動作をまとめて示す。

表 2.2 各素子設計および動作条件

Handedness of CLC	Cavity of Patterned NLC	Polarization of incident light	Reflected light			
			Reflectance, R		Reflected phase, ϕ	
			LCP	RCP	LCP	RCP
l -CLC	$+\theta_{\text{NLC}}$	LCP	25%	25%	0	$+2\theta_{\text{NLC}}$
		RCP	25%	25%	$+2\theta_{\text{NLC}}$	$+4\theta_{\text{NLC}}$
	$-\theta_{\text{NLC}}$	LCP	25%	25%	0	$-2\theta_{\text{NLC}}$
		RCP	25%	25%	$-2\theta_{\text{NLC}}$	$-4\theta_{\text{NLC}}$
r -CLC	$+\theta_{\text{NLC}}$	LCP	25%	25%	$-4\theta_{\text{NLC}}$	$-2\theta_{\text{NLC}}$
		RCP	25%	25%	$-2\theta_{\text{NLC}}$	0
	$-\theta_{\text{NLC}}$	LCP	25%	25%	$+4\theta_{\text{NLC}}$	$+2\theta_{\text{NLC}}$
		RCP	25%	25%	$+2\theta_{\text{NLC}}$	0

(left-handed CLC: l -CLC, right-handed CLC: r -CLC)

(left circular polarization: LCP, right circular polarization: RCP)

2.3 実験

パターン配向したネマティック液晶素子と一様配向したコレステリック液晶素子を組み合わせて提案素子を作製し、その光学特性を評価した。本節では、パターン配向にも用いた縮小投影型マスクレス露光装置および露光パターン、デバイスの作製手法、動作実証のために行った光学実験について述べる。

2.3.1 素子作製

光配向パターンニング装置（縮小投影型マスクレス露光装置）

図 2.16 に光配向パターンニング装置の光学系を示す。装置は、液晶プロジェクター (EPSON, ELP-820)、投影レンズ、中心波長 436 nm のバンドパスフィルター (Edmund Optics, #65-199)、フィルム型直線偏光子、動作波長 400-800 nm のアクロマティック 1/2 波長板 (Thorlabs, AHWP10M-600)、自動回転ステージ (シグマ光機、SGSP-60YAW-0B)、対物レンズ (Olympus, UPlanFL 10X)、産業用カメラ (島津製作所、Moticam1000)、結像レンズで構成される。

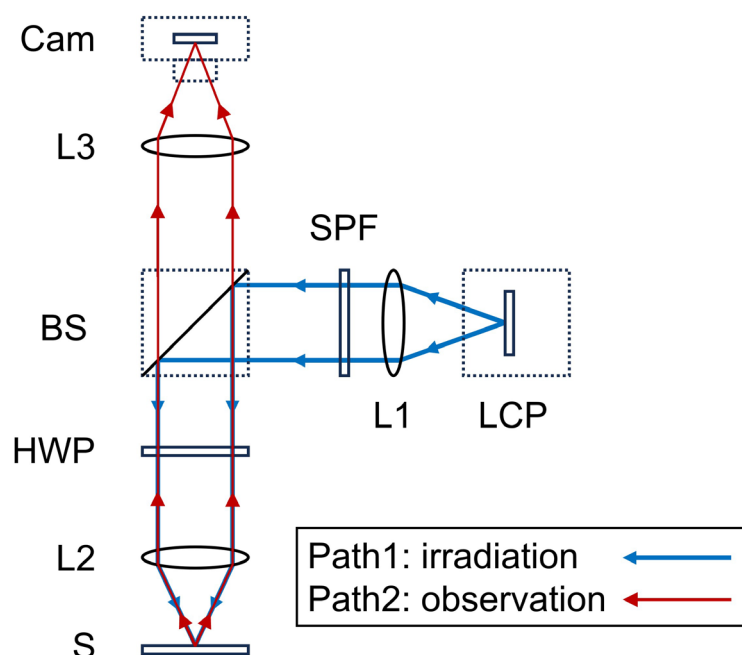


図 2.16 光配向パターンニング装置（縮小投影型マスクレス露光装置）

液晶プロジェクター (LCP) から投影される像を焦点距離 250 mm の平凸レンズ (L1) でコリメートし、バンドパスフィルターおよび直線偏光子 (P)、1/2 波長板 (HWP) を通すこ

とで中心波長 436 nm の直線偏光を得る。対物レンズ (L2) を用いて、ステージ上のサンプルに像を結像させる。結像時の焦点位置合わせのために、小型産業用カメラ (Cam) と結像レンズ (L3) を用いて像の共役面をイメージングし、ステージ位置をマイクロメーターで調整する。プロジェクターから投影される像と 1/2 波長板の光軸方位をプログラム上で逐次制御し、局所的な領域に特定の光軸方位を持つ直線偏光を露光する。上述の操作により、アゾ系光配向膜への配向パターンニングが可能である。

図 2.17 に直線偏光の照射パターンと液晶の配向パターンの関係を示す。図 2.17(a)および (b)は、それぞれ直線偏光の方位角分布および液晶の配向方位角分布を表し、縦軸及び横軸は液晶プロジェクターの画素を意味する。図 2.17(c)は直線偏光方位と液晶の配向方位の関係を示す。液晶は直線偏光方位に対して垂直に配向する。このとき、液晶の配向容易軸方位角 θ_{NLC} は、次の式で与えられる。

$$\theta_{\text{NLC}}(x, y) = \frac{m}{2} \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right), m \in \mathbb{N}$$

ここで、 m は自然数である。 $m = 1$ の時、パターン中央の点周りでネマティック液晶の配向容易軸は 0 から π rad まで回転する。このパターン中央の点は、一般に配向特異点と呼ばれ、配向欠陥のひとつである。通常のネマティック液晶は頭尾の区別を持たないため、配向特異点の欠陥強度は半整数倍の値 ($1/2, 1, 3/2, \dots$) を持つ。

実験では、 $m = 1$ の配向パターンを有する液晶素子を作製した。照射パターンを $\pi/180$ rad (1 度) ずつの領域に分割し、分割領域ごとに像を投影した。ひとつの領域を投影する時間は 30 秒とした。また、投影像の切り替え時に 1/2 波長板の光軸方位を $\pi/360$ rad (0.5 度) 回転させ、露光する直線偏光方位を切り替えた。露光強度はステージ上において約 1.0 mW/cm² であった。

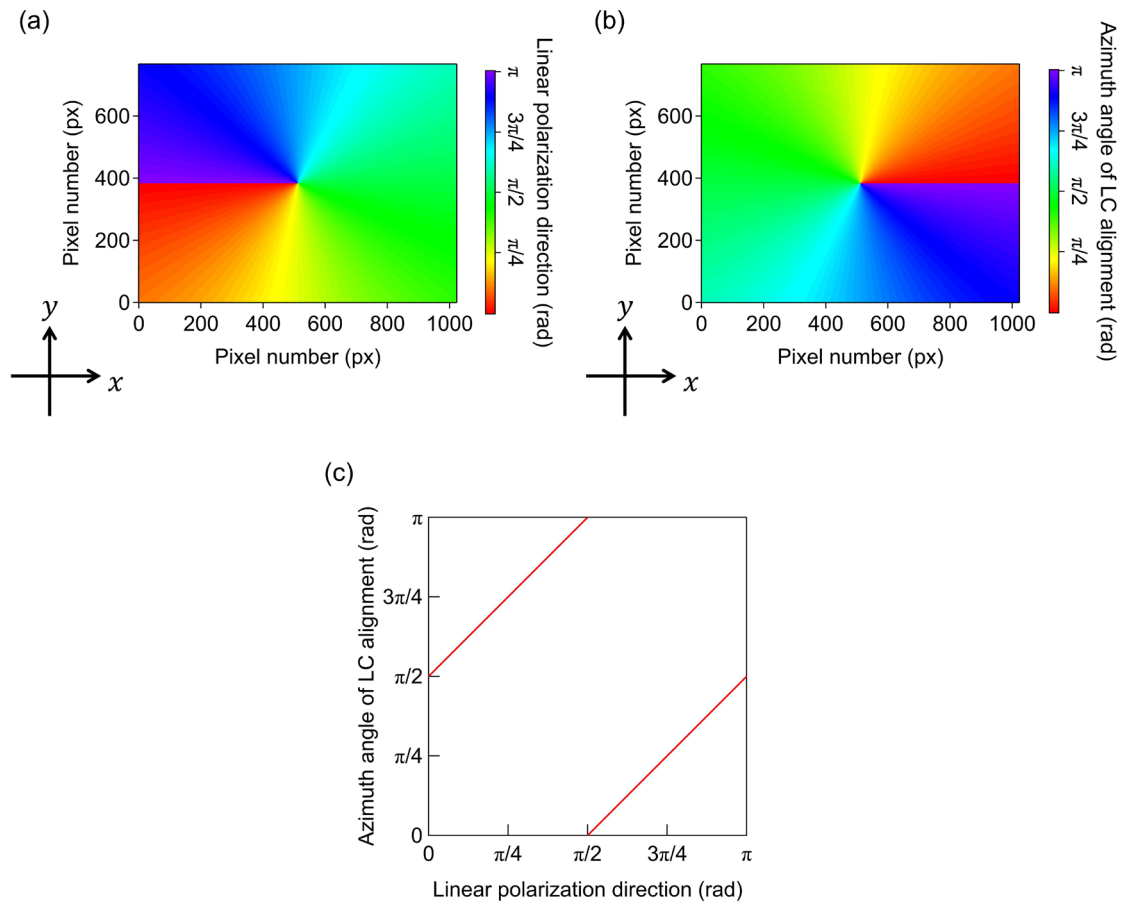


図 2.17 直線偏光の照射パターンと液晶の配向パターンの関係：(a) 直線偏光の照射パターン、(b) 液晶の配向パターン、(c) 直線偏光方位と液晶の配向方位角の関係

デバイス作製

パターン配向したネマティック液晶素子および一様配向したコレステリック液晶素子を作製し、これらの素子同士を貼り合わせ、積層構造を実現した。以下に、素子の作製手順を示す。

① パターン配向したネマティック液晶素子の作製方法

パターン配向したネマティック液晶素子は、アゾ系光配向膜を塗布した電極付きガラス基板を対向させたサンドイッチ型セルに光配向処理を施し、セル空隙に働く毛細管現象を利用し、ネマティック液晶を封入して作製した。

Indium Tin Oxide (ITO) 電極付きガラス基板 (GEOMATEC, 1006) をアルカリ系洗浄液 (フルウ化学, セミコクリーン 56) および蒸留水を用いて、それぞれ 5 分および 10 分間超音波洗浄した。基板はエアブローを用いて一気に乾燥させた。

基板の電極面側にアゾ系光配向剤 (DIC, LIA-03) をスピコートした。スピン条件は 2 段階変速とし、1 段目は 500 rpm で 5 秒、2 段目は 3000 rpm で 30 秒とした。その後、基板を温度 80°C で 2 分間焼成し、塗布した配向膜に残留する溶媒を除去するとともに基板との密着性を高めた。

アゾ系光配向膜を塗布した基板同士を対向させ、直径 6 μm の球状シリカスパーサー (日揮触媒化成, 真絲球) を含んだ紫外線硬化性樹脂 (Norland, NOA68T) を用いて貼り合わせた。球状シリカスパーサーと紫外線硬化性樹脂の重量比は、1:100 とした。紫外線照射装置 (山下電装, HYPERCURE-200) を用いて基板に光強度 128 mW/cm²、ピーク波長 365 nm のランダム偏光を 1 分間照射し、紫外線硬化性樹脂を重合反応させて基板同士を固着させ、サンドイッチ型セルを得た。

光配向パターンニング装置を用いて、サンドイッチ型セルの局所的な領域に直線偏光を逐次照射し、アゾ系光配向膜をパターン配向させた (参照: 図 2-12、図 2-13)。縮小投影型マスクレス露光装置の露光ステップは 1 度とし、1 領域毎の照射時間は 30 秒とした。パターンサイズは約 1.3 mm×1.0 mm とした。

光配向処理を施したサンドイッチ型セルにネマティック液晶材料 (Merck, MLC-3014) を封入し、パターン配向したネマティック液晶素子を得た。封入温度は 70°C とし、室温 25°C まで 1.0°C/min の速度で冷却した。

② 一様配向したコレステリック液晶素子の作製方法

一様配向したコレステリック液晶素子は、ポリイミド系水平配向膜を塗布したガラス基板を布で一様方向にラビングし、それらを反並行に対向させて貼り合わせたアンチパラレル配向のサンドイッチ型セルにコレステリック液晶を封入して作製した。

ガラス基板(アズワン、2-9787-02)をアルカリ系洗浄液(フルウ化学、セミコクリーン 56)および蒸留水を用いて、それぞれ 5 分および 10 分間超音波洗浄した。基板はエアブローを用いて一気に乾燥させた。

基板にポリイミド系水平配向剤(JSR, AL-1254)をスピコートした。スピン条件は 2 段階変速とし、1 段目は 500 rpm で 5 秒、2 段目は 3000 rpm で 30 秒とした。その後、ホットプレートを用いて、配向膜を温度 80°C で 2 分間仮焼成し、塗布した配向膜に残留する溶媒を除去するとともに基板との密着性を高めた。配向膜をイミド化反応させるために電子オーブンを用いて、温度 200°C で 60 分間本焼成した。

ラビング装置(EHC, RM-50)を用いて、配向膜の表面をロール状の布で一様方向に擦った。ラビングロールの布はレーヨン製を使用し、ロールとステージの高さは 3.68 mm とした。ロールおよびステージの一次側モーターの回転速度はそれぞれ 1250 rpm および 1700 rpm とした。ステージの往復回数は 5 回とした。

配向膜のラビング方向が反並行となるように基板同士を対向させ、直径 6 μm の球状シリカスパーサー(日揮触媒化成、真絲球)を含んだ紫外線硬化性樹脂(Norland, NOA68T)を用いて貼り合わせた。紫外線照射装置(山下電装、HYPERCURE-200)を用いて基板に光強度 128 mW/cm²、ピーク波長 365 nm のランダム偏光を 1 分間照射し、紫外線硬化性樹脂を重合反応させて基板同士を固着させた。

作製したセルにコレステリック液晶材料を封入し、一様配向したコレステリック液晶素子を得た。コレステリック液晶材料は母液晶(Merck, MLC-2140)とカイラル材料(HCCH, S-5011)を重量比 98:2 で混合させて調製した。封入温度は 70°C とし、室温 25°C まで 1.0°C/min の速度で冷却した。

図 2.18 に作製素子の偏光顕微鏡像および伝搬特性を示す。図 2.18 (a)にパターン配向したネマティック液晶素子の偏光顕微鏡像および透過率スペクトルを示す。偏光顕微鏡観察はクロスニコル下で行った。また、鋭敏色板を挿入して観察した。図中央の配向特異点から左右に伸びる対称的な二つの暗線が得られた (2-brush)。鋭敏色板を挿入した場合、図上側は薄い水色、図下側は薄い黄色となった。これは干渉色図表 (偏光色図表) から、図上側でリタデーションが小さく、図下側で大きいことを意味することが分かる。つまり、図上側では鋭敏色板の光軸に直交する方向にネマティック液晶が配向しており、図下側では鋭敏色板の光軸に平行する方向にネマティック液晶が配向している。さらに、素子を左回りに 45 度回転させると、図右上が薄い水色、左下が薄い黄色となった。したがって、中央にある配向特異点周りでネマティック液晶の配向方位が 0 から π rad まで左回りに連続的に分布したパターンが得られたことが分かる。透過率スペクトルは対角位となる領域で測定した。透過率のピーク値は約 90%であった。この光損失の原因は、基板表面のフレネル反射および電極層の吸収が考えられる。波長 532 nm において、透過率がピーク値の約半分であった。したがって、作製素子は波長 532 nm において 1/4 波長リタデーションの条件を満たすことが分かった。

図 2.18(b) 一様配向したコレステリック液晶の偏光顕微鏡像および反射率スペクトルを示す。偏光顕微鏡は落射光学系とし、オープンニコルで観察した。入射光は右円偏光とした。セルギャップに若干の厚さムラがあるためコレステリック液晶特有のグランジャンステップ (Grandjean step) が確認されたが、基板全面で一様に配向したテクスチャーが得られた。反射率スペクトルのピーク値は約 90%でフレネル反射による光損失があるものの十分な円偏光反射特性が得られた。また、反射波長帯域は 492-560 nm であり、波長 532 nm の光を反射することが分かった。

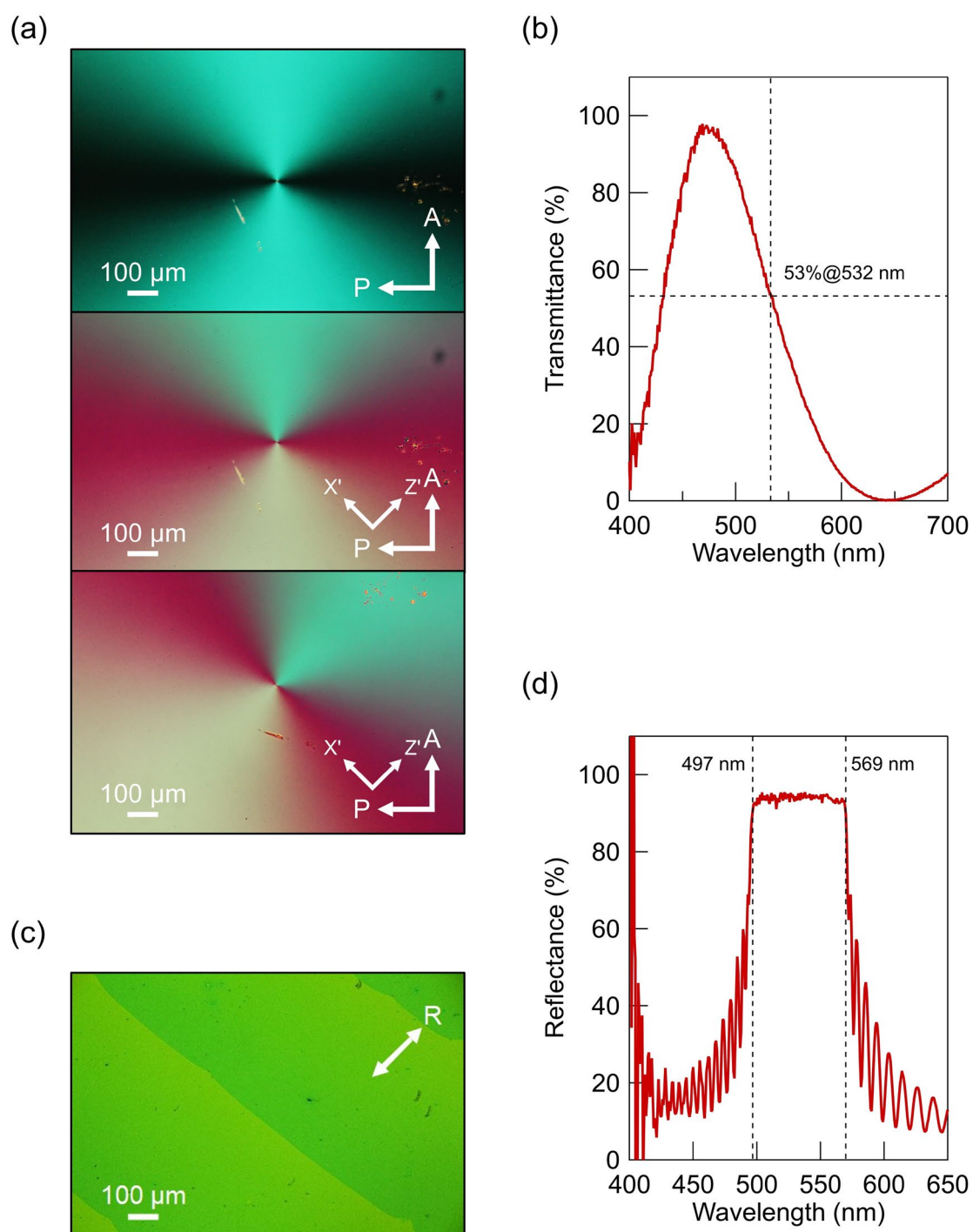


図 2.18 作製素子の偏光顕微鏡像および伝搬特性：パターン配向したネマティック液晶素子の(a)偏光顕微鏡像および(b)透過率スペクトル、一様配向したコレステリック液晶の(c)偏光顕微鏡像および(d)反射率スペクトル)

2.3.2 動作実証

干渉像観察

図 2.19 に干渉像観察用の光学系を示す。光学系は、縦型シングルモード半導体固体レーザー (LASOS, DPPS laser series GLK32XX TS)、フィルム型直線偏光子、1/4 波長板 (Thorlabs, WPQ10M-532)、キューブ型無偏光ビームスプリッター、円形連続可変型金属 ND フィルター (Thorlabs, NDC-50C-2)、アルミ平面ミラー、小型産業用カメラ (IDS Imaging, UI-3580CP-C-HQ Rev.2) で構成されるマイケルソン干渉計である。

発振波長 532 nm のレーザーを直線偏光子 (P1) および 1/4 波長板 (Q1) に通して、入射円偏光を得た。無偏光ビームスプリッター (BS) を用いて、入射円偏光を参照光および物体光側の 2 つの光路に分岐させた。参照光側のミラーおよび物体光側の素子の反射率は理想的に、それぞれ 100% および 50% である。このため、減光フィルター (ND) を用いて参照光の光強度を物体光の光強度と同程度まで減衰させた。また、1/4 波長板 (Q3) を用いて参照光の円偏光状態を選択した。参照光および物体光は再び無偏光ビームスプリッター (BS) で合流し、その一部は検出器側の光路へ進行し、直線偏光子 (P2) および 1/4 波長板 (Q2) からなる円偏光フィルターによって干渉する円偏光成分のみがカメラ (Cam) で検出される。

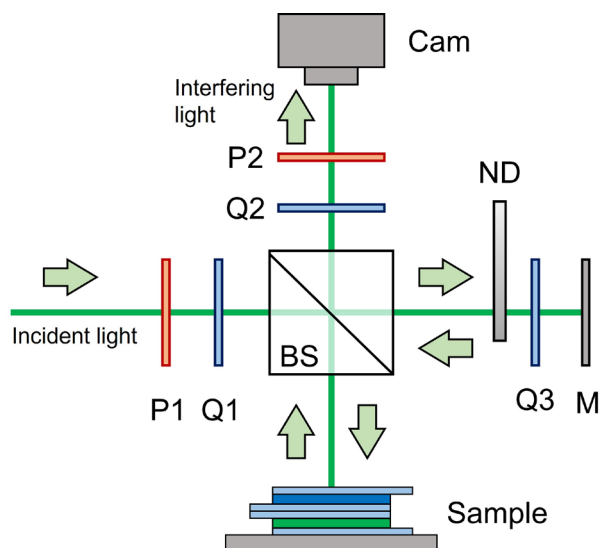


図 2.19 干渉像観察に用いる光学系

図 2.20 に反射円偏光成分の干渉像の検出原理を示す。図 2.20(a)および(b)は、左円偏光入射時のそれぞれ反射左円偏光成分および右円偏光成分の検出原理を示す。また、左右の図は、それぞれ参照光および物体光側の光路を示す。ここで、左円偏光入射時の反射左円偏光成分の干渉像を検出する場合について考える。

参照光は、円偏光フィルター (P1 および Q1) によって左円偏光に変換され、無偏光ビームスプリッター (BS) を直進し、参照ミラー側光路へ進行する。進行する左円偏光は減光フィルター (ND) を通りミラーで反射される。反射左円偏光は再び減光フィルター (ND) を通り、無偏光ビームスプリッター (BS) に入射し、検出器側光路に進行する。検出器側に進行する左円偏光は、1/4 波長板 (Q2) で水平な直線偏光 (H) に変換される。水平な直線偏光は直線偏光子 (P2) を通り、カメラ (Cam) で検出される。

物体光は、円偏光フィルター (P1 および Q1) によって左円偏光に変換され、無偏光ビームスプリッター (BS) を反射し、サンプル側光路へ進行する。進行する左円偏光はサンプル (Sample) から反射され、左右円偏光成分に偏光分離する。反射光は無偏光ビームスプリッター (BS) を直進し、検出器側光路へ進行し、そして 1/4 波長板 (Q2) によって左円偏光および右円偏光成分は、それぞれ水平および垂直な直線偏光 (H および V) に変換される。垂直な直線偏光 (V) は直線偏光子 (P2) で遮断させる。一方で、水平な直線偏光 (H) は直線偏光子 (P2) をそのまま透過してカメラ (Cam) で検出される。

したがって、検出器側カメラにおいて、左円偏光の参照光と物体光の左円偏光成分が水平な直線偏光として検出される。

次に、左円偏光入射時の反射右円偏光成分の干渉像を検出する場合について考える。参照光は、円偏光フィルター (P1 および Q1) によって左円偏光に変換され、無偏光ビームスプリッター (BS) を直進し、参照ミラー側光路へ進行する。進行する左円偏光は減光フィルター (ND) を通り、1/4 波長板 (Q3) により水平な直線偏光 (H) に変換され、ミラーで反射される。水平な直線偏光 (H) は再び 1/4 波長板 (Q3) を通り右円偏光に変換され、減光フィルター (ND) を通り、無偏光ビームスプリッター (BS) に入射し、検出器側光路に進行する。検出器側に進行する右円偏光は、1/4 波長板 (Q2) で垂直な直線偏光 (V) に変換される。垂直な直線偏光は直線偏光子 (P2) を通り、カメラ (Cam) で検出される。

物体光は、円偏光フィルター (P1 および Q1) によって左円偏光に変換され、無偏光ビームスプリッター (BS) を反射し、サンプル側光路へ進行する。進行する左円偏光はサンプル (Sample) から反射され、左右円偏光成分に偏光分離する。反射光は無偏光ビームスプリッター (BS) を直進し、検出器側光路へ進行し、そして 1/4 波長板 (Q2) によって左円偏光および右円偏光成分は、それぞれ水平および垂直な直線偏光 (H および V) に変換される。水

平な直線偏光 (H) は直線偏光子 (P2) で遮断させる。一方で、垂直な直線偏光 (V) は直線偏光子 (P2) をそのまま透過してカメラ (Cam) で検出される。

したがって、検出器側カメラにおいて、右円偏光の参照光と物体光の右円偏光成分が垂直な直線偏光として検出される。

図 2.20(c)および(d)は右円偏光入射時のそれぞれ反射左円偏光成分および右円偏光成分の検出原理を示す。また、左右の図は、それぞれ参照光および物体光側の光路を示す。右円偏光入射時も左円偏光入射時と同様の原理で、1/4 波長板 (Q3) による参照光の円偏光選択と円偏光フィルター (P2 および Q3) による干渉光の円偏光成分の選択により、測定すべき干渉像が検出できる。

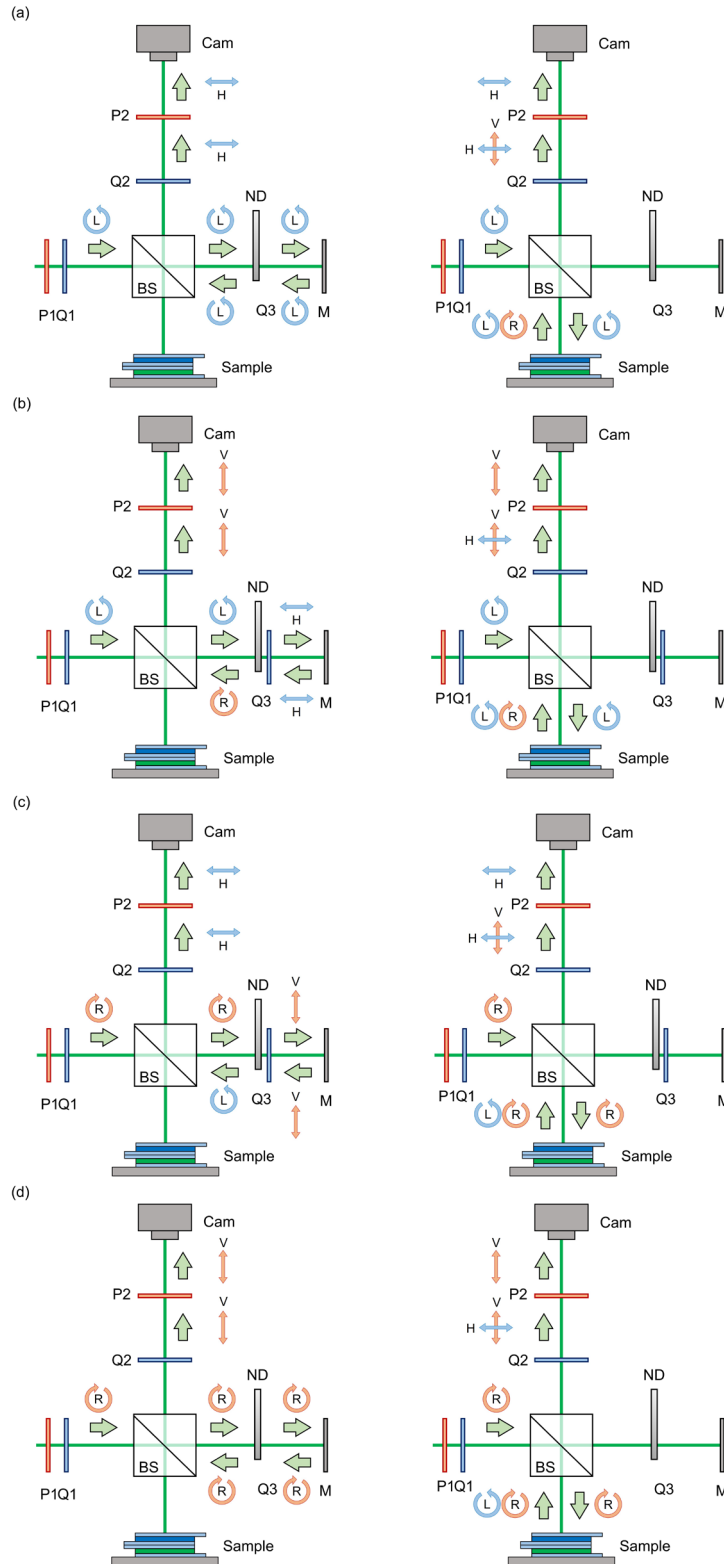


図 2.20 反射円偏光成分の干渉像の検出原理：左円偏光入射時の(a)反射左円偏光成分および(b)反射右円偏光成分の干渉、右円偏光入射時の(c)反射左円偏光成分および(d)反射右円偏光成分の干渉

図 2.21 に観察した干渉像を示す。図 2.21(a)および(b)は、左円偏光入射時の反射光の左円偏光成分および右円偏光成分を示す。反射円偏光成分のどちらにおいても、光渦の位相特異点で干渉縞が分岐するフォーク状の干渉縞が得られた。反射左円偏光成分のフォークの数は 2、反射右円偏光成分のフォークの数は 1 であった。図 2.21(c)および(d)は、右円偏光入射時の反射光の左円偏光成分および右円偏光成分を示す。反射左円偏光成分ではフォーク状の干渉縞が得られ、そのフォーク数は 1 であった。反射右円偏光成分ではストライプ状の干渉縞が得られた。フォーク状干渉縞のフォーク数は、光渦が持つ位相特異点のトポロジカルチャージに対応する^[101]。したがって、作製素子に左円偏光を入射した時、反射円偏光成分ではどちらも光渦が生成され、それらのトポロジカルチャージは 2 倍異なることが分かった。

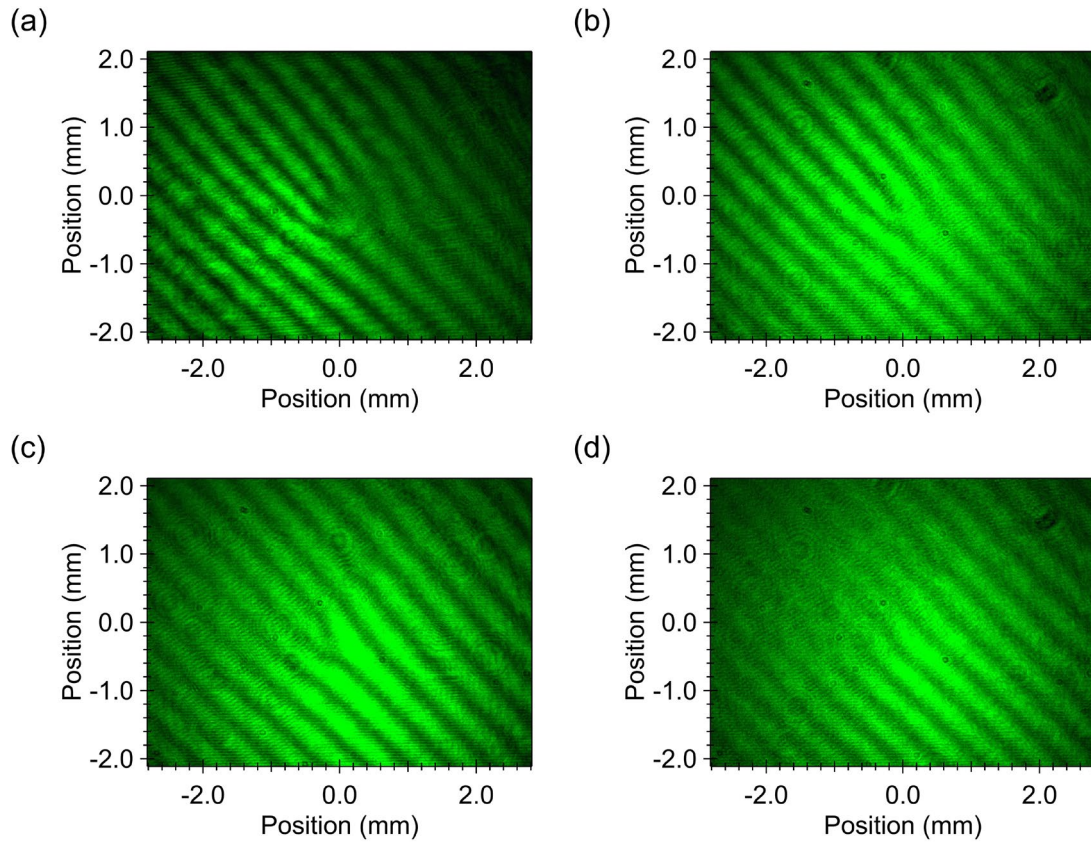


図 2.21 実験で得られた干渉像：左円偏光入射時の(a)反射左円偏光成分および(b)反射右円偏光成分、右円偏光入射時の(c)反射左円偏光成分および(d)反射右円偏光成分

回折像観察

図 2.22 に回折像観察用の光学系を示す。光学系は、スーパーコンティニュームレーザー (NKT Photonics, SuperK COMPACT)、円形連続可変型金属 ND フィルター (Thorlabs, NDC-50C-2)、バンドパスフィルター (Edmund Optics, #65-155)、フィルム型直線偏光子、1/4 波長板 (Thorlabs, WPQ10M-532)、キューブ型無偏光ビームスプリッター、小型産業用カメラ (IDS Imaging, UI-3580CP-C-HQ Rev.2) で構成される。

スーパーコンティニュームレーザーから出射した白色ビームは ND フィルターにより光強度が調整され、中心波長 532 nm、半値全幅 10 nm バンドパスフィルターを用いて光学濃度 4 の単色ビームに変換される。単色ビームは、直線偏光子および 1/4 波長板によって円偏光に変換され、さらに無偏光ビームスプリッターを用いて光路を分岐されて作製素子に垂直入射される。作製素子からの反射光は、再び無偏光ビームスプリッターに戻され、検出器側光路に分岐する。無偏光ビームスプリッターと検出器の間には、円偏光フィルターが配置され、検出器において作製素子からの反射光の円偏光成分が観察される。

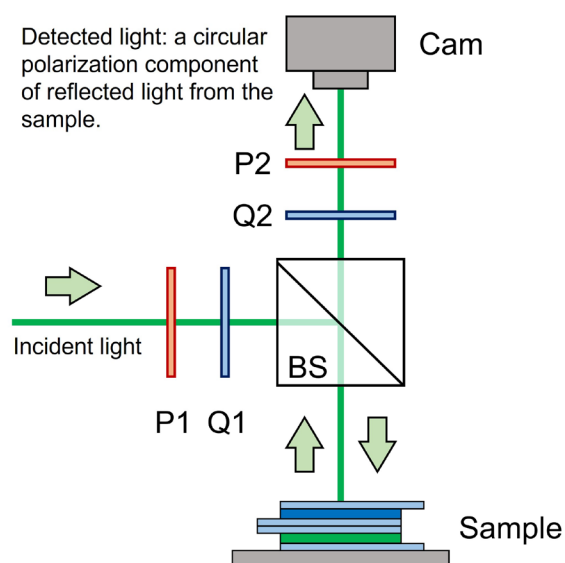


図 2.22 回折像観察に用いた光学系

図 2.23 に回折像の反射円偏光成分の検出原理を示す。図 2.23(a)および(b)は左円偏光入射時のそれぞれ反射左円偏光成分および右円偏光成分の検出原理を示し、図 2.23(c)および(d)は右円偏光入射時のそれぞれ反射左円偏光成分および右円偏光成分の検出原理を示す。円偏光フィルター (Q2 および P2) を用いて、サンプルからの反射円偏光成分を選択することで、カメラで回折像が検出できる。

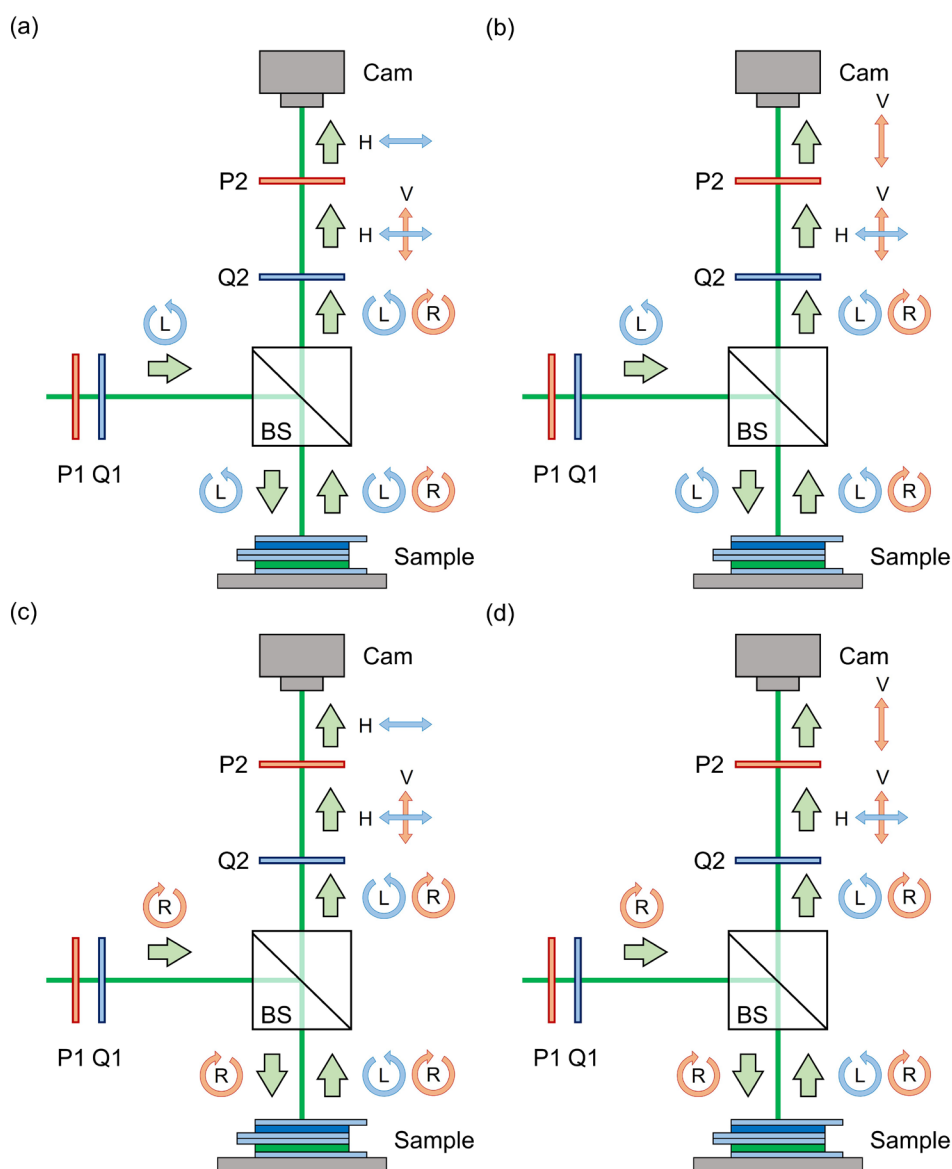


図 2.23 回折像の反射円偏光成分の検出原理：左円偏光入射時の(a)反射左円偏光成分および(b)反射右円偏光成分、右円偏光入射時の(c)反射左円偏光成分および(d)反射右円偏光成分の回折像

図 2.24 に観察した回折像を示す。図 2.24 (a)および(b)は、それぞれ左円偏光入射時の反射光の左円偏光成分および右円偏光成分を示し、図 2.24 (c)および(d)は、それぞれ右円偏光入射時の反射光の左円偏光成分および右円偏光成分を示す。右円偏光入射時の右射左円偏光成分以外はすべてドーナツ状の光強度プロファイルが観察された。

図 2.25(a)および(b)は、左円偏光入射時の反射左円偏光および右円偏光成分の光強度プロファイルを示し、図 2.25(c)はドーナツ状強度プロファイルの中心軸上で強度を抽出した結果を示している。左右円偏光の位相特異点の位置はほぼ同じ位置にあり、その誤差は $15\text{ }\mu\text{m}$ 程度であった。この誤差が生じた原因として、光学系のコンポーネントの位置ずれやカメラの空間分解能 (画素サイズ) が影響したと考えられる。反射光の左右円偏光成分の検出には、検出器側の円偏光フィルターとして使用した直線偏光子 (P2) の光軸方位を変更する必要があった。ここで、直線偏光子の屈折率を 1.57、厚さを $300\text{ }\mu\text{m}$ とし、入射角が 0 度および 10 度であったと仮定すると、約 $18\text{ }\mu\text{m}$ の位置ずれが生じると見積れる。また、小型産業用カメラの画素サイズが $2.2\text{ }\mu\text{m}$ であり、それ以上の高精細な位置検出が困難であった。したがって、発生した誤差は評価光学系によるものと考えられる。左右円偏光成分のドーナツ径はそれぞれ異なり、左円偏光成分のドーナツ径は右円偏光成分のドーナツ径よりも大きかった。一般に、光渦が持つドーナツ状光強度分布のドーナツ径は、光渦のトポロジカルチャージに対応し、トポロジカルチャージが大きいほどドーナツ径も大きくなる。実験結果は、この事実に対応していることも分かった。以上の結果から、作製素子が同軸光線上に異なるトポロジカルチャージを有する光渦を生成できることが分かった。

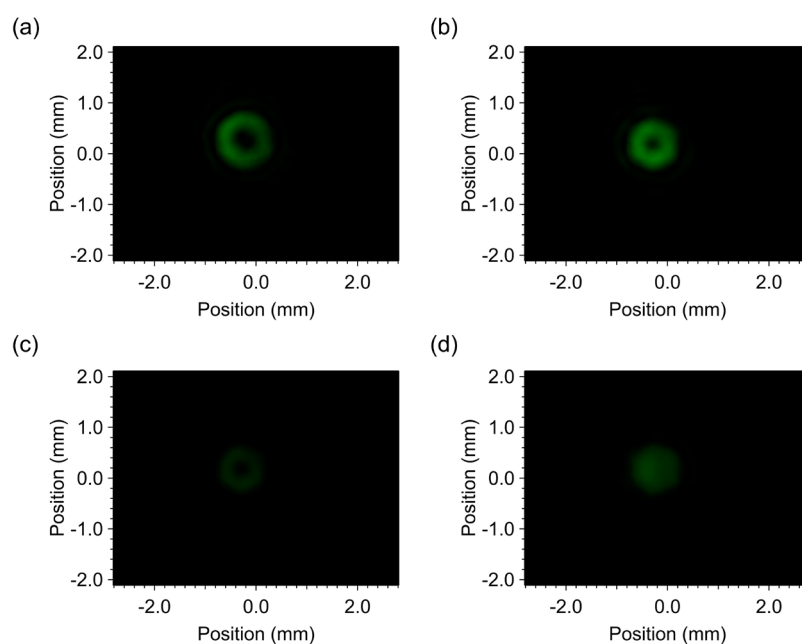


図 2.24 実験で得られた回折像: 左円偏光入射時の(a)反射左円偏光成分および(b)反射右円偏光成分、右円偏光入射時の(c)反射左円偏光成分および(d)反射右円偏光成分の回折像

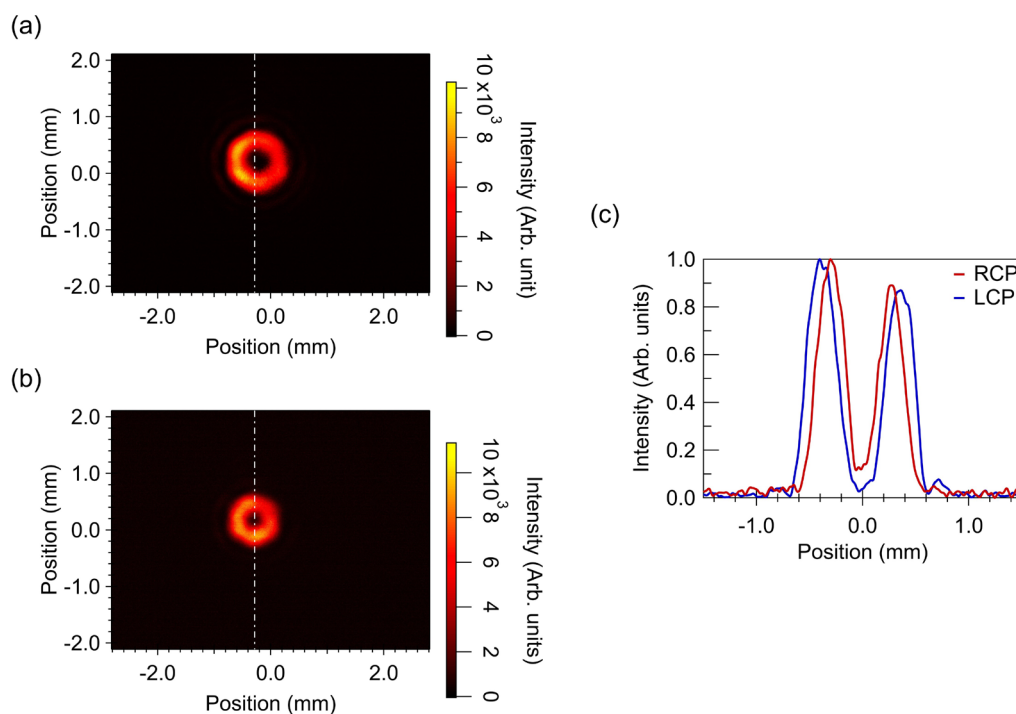


図 2.25 回折像の光強度分布: 左円偏光入射時の(a)反射左円偏光成分および(b)反射右円偏光成分、(c)ドーナツ穴の中心を通る光強度プロファイル

2.4 結言

本研究では、パターン配向したネマティック液晶素子と一様配向したコレステリック液晶素子を組み合わせた液晶積層構造を提案し、異なる2つの光渦を同軸光線上に生成できることを明らかにした。本研究によって得られた知見を以下に要約する。

1. パターン配向したネマティック液晶素子と一様配向したコレステリック液晶素子を組み合わせた液晶積層構造を提案し、その動作原理を示した。パターン配向したネマティック液晶素子で生成された円偏光光渦がコレステリック液晶素子で反射され、再びパターン配向したネマティック液晶素子を伝搬する。これにより、提案素子からの反射光の円偏光成分が同軸光線上かつ光渦として伝搬することが示された。
2. 一次元光伝搬解析（ジョーンズマトリックス法、 4×4 マトリックス法）を用いて提案素子の光伝搬特性を明らかにした。提案素子からの反射光の左右円偏光成分には、2倍異なるベリー位相が付与されることが分かった。伝搬光に付与されるベリー位相の値とその符号は、ネマティック液晶の配向方位分布およびコレステリック液晶の螺旋の向きによって決定することが分かった。
3. パターン配向したネマティック液晶素子と一様配向したコレステリック液晶素子を作製し、光伝搬特性（干渉像観察、回折像観察）を評価した。
 - (ア) 干渉像観察：反射光の円偏光成分の干渉像がフォーク状となることが分かった。
さらに、フォーク状干渉縞のフォーク数から左右円偏光成分で2倍異なることが分かった。これらのことから、反射光の左右円偏光成分には光渦が生成され、それら光渦が持つ位相特異点のトポロジカルチャージは2倍異なることが明らかとなった。
 - (イ) 回折像観察：反射光の円偏光成分の回折像が、ドーナツ状の光強度分布を持つことが分かった。光強度プロファイルから、左右円偏光成分でドーナツ穴の径が異なること、それぞれの光渦が持つ位相特異点の位置が一致していることが分かった。このことから、同軸光線上に異なるトポロジカルチャージを有する光渦生成が実証された。

第3章 親液撥液パターニングを用いた液晶フレネルゾーンプレートによる焦点距離の精密制御

3.1 緒言

可変焦点レンズを用いた焦点距離の制御技術が近年注目されている。光を集光することは、光マニピュレーション^[81, 102]やバイオイメージング^[103, 104]、太陽光発電^{[105][106]}、ディスプレイ^[107]など、さまざまな用途において重要である。これら多くのアプリケーションでは、集光スポット位置を制御する必要があり、従来手法ではレンズや対象物の位置を移動させることで実現してきた。この手法では、数マイクロメートル以下の精度で集光スポット位置を制御可能であるが、振動による大気の影響や摩擦による装置の劣化、移動範囲の狭さ、可動部の小型化のための空間的制約といった本質的な欠点がある。したがって、これらの欠点を克服するため、機械駆動部を持たない可変焦点レンズが必要である。

可変焦点レンズにはいくつかの種類がある^[108–111]。中でも、液晶レンズは電氣的に焦点距離を制御できる特長から^[100]、光トラッピング^[112, 113]や眼科用途^[114–118]、仮想現実・拡張現実（VR/AR）^[15, 119–122]等、さまざまな光学分野で注目されている。先行研究において、液晶レンズと高倍率対物レンズを組み合わせた光トラッピング技術が提案^[112, 123–126]され、マイクロメートルオーダーの精密な焦点距離制御を達成した。しかしながら、対物レンズを用いるため、光マニピュレーション可能な領域は制限されてきた。したがって、対物レンズを用いずに精密な焦点距離制御が可能な技術が求められる。

近年、フレネルゾーンプレートと呼ばれる回折レンズを用いた光マニピュレーションが報告されている^[127–130]。フレネルゾーンプレートとは、複数の同心円からなる幾何学的構造を持ち、回折現象に基づいて透過光を集光することができる光学素子で、フラットな形状を有し、基板表面上でアレイ化できる特長を有する^[131–133]。さらに、フレネルゾーンプレートは入射波長に反比例した焦点距離を持つため^[134]、チューナブルレーザーなどを用いて入射波長を選択することで精密な焦点距離制御が実現できる^[131, 132, 135]。先行研究では、振幅型フレネルゾーンプレートにスーパーコンティニウムレーザーを入射し、カラーフィルターを用いて特定の波長を選択することで、精密な焦点距離制御を達成している^[136]。ほかの先行研究では、同軸上にセットアップされた 2 種類のレーザーをフレネルゾーンプレートに入射し、レーザーを切り替えることで精密な焦点距離制御を達成している^[137–139]。しかしながら、先行研究のアプローチではシームレスな焦点距離制御を達成するために、高価で実装コストの高い波長可変レーザーが必要であった。この課題解決手法の一つとして、光源の

波長を変えずに位相回折条件を変調することで焦点距離制御を実現するアプローチが考えられる。

そこで本研究では、位相回折条件を変調可能な液晶フレネルゾーンプレートを開発し、精密な焦点距離制御法を実証する。これまでに、液晶を用いた位相型フレネルゾーンプレートが数多く報告されているが[52, 133, 140–147]、従来のデバイス構造では位相回折条件を変調できなかった。また、精密な焦点距離制御の達成に必要なマイクロスケールの口径を実現できなかった。本研究では、新たな液晶配向制御手法を用いて液晶フレネルゾーンプレートを開発し、精密な焦点距離制御動作を実証した。

3.2 原理

3.2.1 提案素子

素子構造

図 3.1 に提案する素子構造を示す。提案素子はネマティック液晶層、垂直配向膜が塗布した電極付きガラス基板、垂直配向膜及び水平配向膜が塗布した電極付きガラス基板で構成される。垂直配向膜及び水平配向膜が塗布した電極付きガラス基板は、二つの異なる配向膜によってフレネルゾーンを形成する。フレネルゾーンとは、複数の同心円から成る幾何学パターンである。隣り合ったゾーン（輪帯）では、①基板の両界面とも垂直配向膜を有する領域と②一方の界面は垂直配向膜もう一方の界面は水平配向膜を有する領域が交互になっている。領域①ではネマティック液晶が垂直配向、領域②ではハイブリッド配向を示す。上下基板間に電圧を印加すると領域①では液晶の配向変化は生じないが、領域②では電圧に応じた液晶の再配向が生じ、ハイブリッド配向から徐々に垂直配向へと変化する。

位相型フレネルゾーンプレートは、隣り合うゾーン（領域①および②）を透過した光の位相差が $\Delta\phi = (2m - 1)\pi$ ラジアンとなる波長で最も回折が生じ、最も強く集光される。位相差が $\Delta\phi = 2m\pi$ ラジアンとなる波長では全く回折が生じずに集光しない。フレネルゾーンの焦点距離は波長に反比例するため（式 3.1 参照）、白色光を入射すると、特定の波長でのみ集光スポットが形成される。回折条件を変調することで焦点距離制御が実現可能であり、本研究では液晶を用いることで動作を実証した。

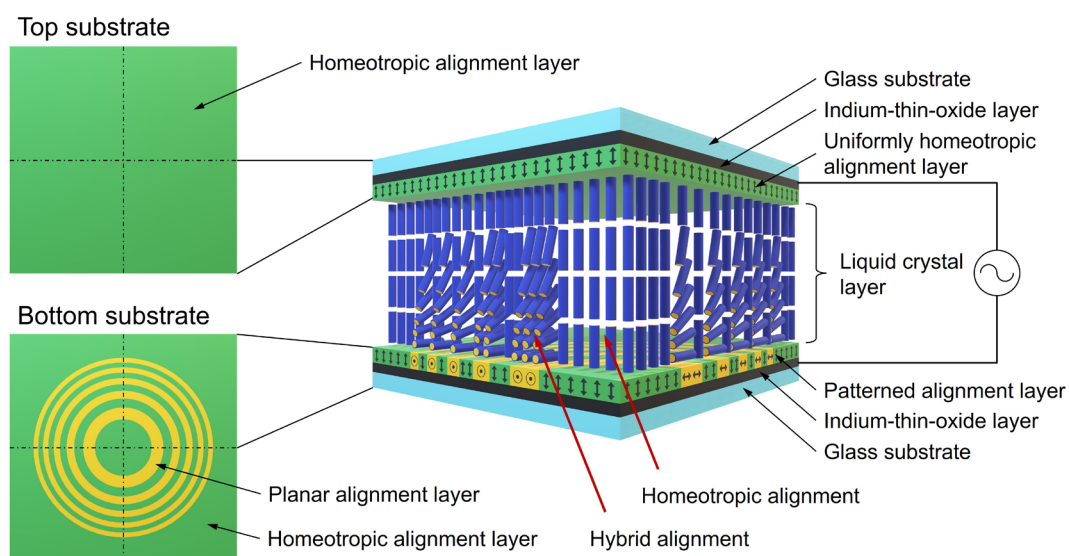


図 3.1 提案素子の構造

動作原理

図 3.2 に提案素子の動作原理を示す。図 3.2(a)は提案素子による焦点距離の制御動作を示す。図 3.2(b)および(c)、(d)は、それぞれ焦点距離の波長依存性および回折光強度の電圧依存性、焦点距離の電圧依存性を示す。素子に波長 λ_R および λ_G, λ_B を含む白色光を入射することを考える。この時の透過光は、回折条件を満たす波長 λ_G で集光され、回折条件を満たさない波長 λ_R, λ_B では集光されない。したがって、波長 λ_G に対応した焦点距離 f_G を中心とした集光スポットが形成される。次に、提案素子に電圧を印加するとハイブリッド配向した液晶が電界方向に再配向し、ゾーン間の透過光の位相差が変化し、回折条件が変化する。新たに回折条件を満たす波長 λ_B は集光され、回折条件を満たさない波長 λ_G, λ_R は集光されない。よって、波長 λ_B に対応した焦点距離 f_B を中心とした集光スポットが形成される。したがって、提案素子は、位相回折条件を満たす波長を電氣的に変調することで集光スポット位置、すなわち焦点距離を制御できる。

提案素子の動作は波長ごとの回折効率を電氣的に変調することで実現され、回折効率の低い集光されない成分は素子を直進する透過光として現れる。この集光されない白色ノイズを利用して、動作波長をモニタリングすることも可能である。

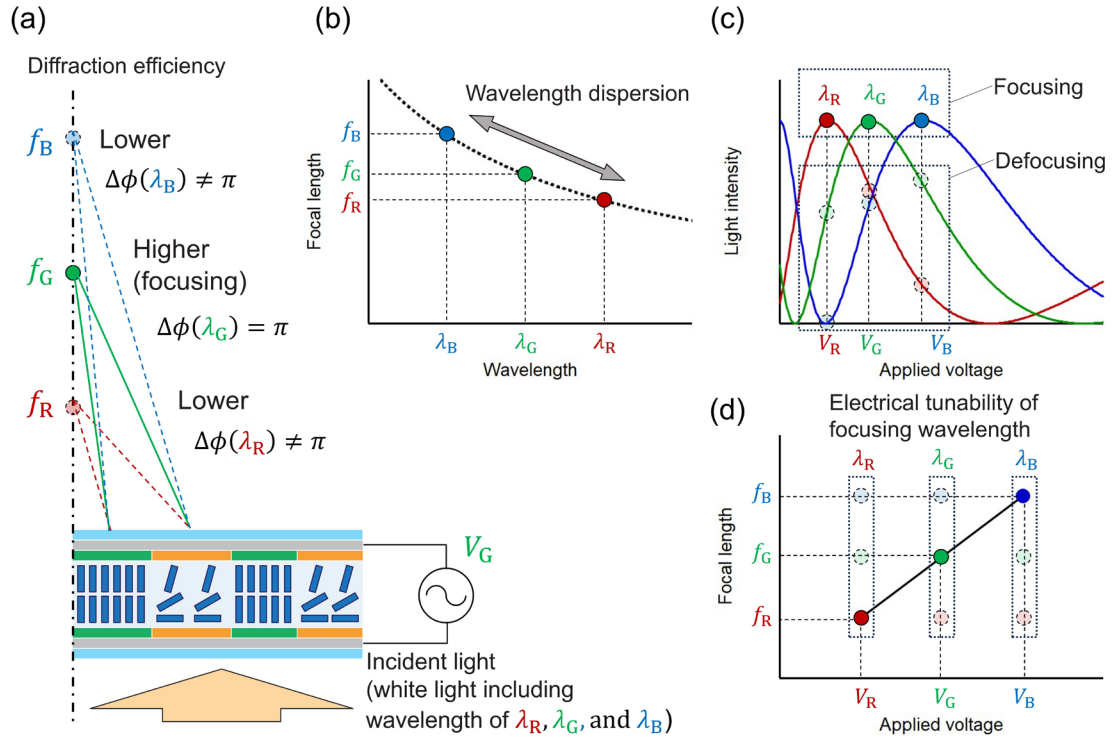


図 3.2 提案素子の動作原理:(a) 焦点距離の制御動作、(b) 焦点距離の波長依存性、(c) 回折光強度の電圧依存性、(d) 焦点距離の電圧依存

フレネルゾーンの焦点距離 f_{FZP} は、次式で与えられる。

$$f_{\text{FZP}} = \frac{r_g^2}{gm\lambda}$$

ここで、 r_g は最外輪帯半径、 g は輪帯数、 m は回折次数、 λ は入射波長を表す。フレネルゾーンの焦点距離は最外輪帯半径 r_g の2乗に比例し、入射波長 λ に反比例する。波長域 λ_1 から λ_2 における焦点距離の範囲 Δf_{FZP} は、次式となる。

$$\Delta f_{\text{FZP}} = \frac{r_g^2}{gm} \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) = \frac{r_g^2}{gm} \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 \lambda_2} \right)$$

$r_g = 325 \text{ } \mu\text{m}$ 、 $g = 8$ 、 $m = 1$ 、 $\lambda_1 = 400 \text{ nm}$ 、 $\lambda_2 = 800 \text{ nm}$ とした場合、 $\Delta f_{\text{FZP}} = 16.5 \text{ mm}$ となり、焦点距離の波長感度は $41.25 \text{ } \mu\text{m}/\text{nm}$ となる。したがって、位相型フレネルゾーンプレートを用いてマイクロメートルスケールの焦点距離制御が可能となる。

位相型のフレネルゾーンは、隣り合ったゾーンを透過した光の位相差が π ラジアンの際に最大の回折効率で透過光を集光する。提案素子の回折挙動をジョーンズマトリックス法により説明する。ここで、入射偏光を次式で表す。

$$\mathbf{E}_{\text{in}} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_0 \cos(\theta) \\ E_0 \sin(\theta) \end{bmatrix}$$

領域①の液晶は垂直に配向しているため、伝搬光は常光屈折率 n_o を感じる。一方で、領域②の液晶はハイブリッド配向しており、膜厚方向の屈折率 $n(z)$ は z 方向に分布を持つ ($n_o < n(z) < n_e$)。ネマティック液晶層の膜厚が d_{NLC} の場合、領域①および②の光路長 R_{HOME} および R_{HYB} は、次式となる。

$$R_{\text{HOME}} = \int_{z=0}^{d_{\text{NLC}}} n_o dz$$

$$R_{\text{HYB}} = \int_{z=0}^{d_{\text{NLC}}} n(z) dz$$

領域②のハイブリッド配向の配向方位が x 軸方向の時、領域①および②の伝搬マトリックス \mathbf{M}_{HOME} および \mathbf{M}_{HYB} は、次式で表される。

$$\mathbf{M}_{\text{HOME}} = \exp\left(j \frac{2\pi R_{\text{HOME}}}{\lambda}\right) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_{\text{HYB}} = \exp\left(j \frac{2\pi R_{\text{HOME}}}{\lambda}\right) \begin{bmatrix} \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} (R_{\text{HYB}} - R_{\text{HOME}})\right) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

フーリエ光学理論に基づいて m 次の回折光 \mathbf{D}_m は、次式で与えられる。

$$\mathbf{D}_m = \frac{1}{2S_1} \int_{S=0}^{S_1} (\mathbf{M}_{\text{HOME}} + \mathbf{M}_{\text{HYB}}) \mathbf{E}_{\text{in}} \exp\left(-j 2m\pi \frac{S}{2S_1}\right) dS \begin{bmatrix} -E_0 \cos(\theta_r) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{D}_m &= \frac{1}{2\pi r_1^2} \left\{ \int_{\theta_r=0}^{2\pi} \int_{r=0}^{r_1} \mathbf{M}_{\text{HOME}} \mathbf{E}_{\text{in}} \exp\left(-jm\pi \frac{r^2}{r_1^2}\right) dr d\theta_r \right. \\
 &\quad + \int_{\theta_r=0}^{2\pi} \int_{r=r_1}^{r_2} \mathbf{M}_{\text{HYB}} \mathbf{E}_{\text{in}} \exp\left(-jm\pi \frac{r^2}{r_1^2}\right) dr d\theta_r + \dots \\
 &\quad \left. + \int_{\theta_r=0}^{2\pi} \int_{r=r_{g-1}}^{r_g} \mathbf{M}_{\text{HYB}} \mathbf{E}_{\text{in}} \exp\left(-jm\pi \frac{r^2}{r_1^2}\right) dr d\theta_r \right\} \begin{bmatrix} -E_0 \cos(\theta_r) \\ 0 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{D}_m &= \frac{1}{jm\pi} \exp\left(j \frac{2\pi R_{\text{HOME}}}{\lambda}\right) \left\{ \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} (R_{\text{HYB}} - R_{\text{HOME}})\right) - 1 \right\} \begin{bmatrix} -E_0 \cos(\theta_r) \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

ここで、 S_1 はフレネルゾーンの開口面積を表す。 θ_r は直線偏光方位、 r_g は輪帯半径を表す。添え字 g の奇数および偶数は、それぞれ領域①および②を意味する。 m 次の回折光は x 軸方向の偏光成分のみで生じ、その大きさは直線偏光方位に依存する。よって、提案素子を透過した光はハイブリッド配向の配向方位に平行な偏光成分のみが回折される。

回折効率 $\boldsymbol{\eta}_m = [\eta_{x,m} \ \eta_{y,m}]^T$ は、回折光の振幅 $\mathbf{D}_m = [D_{x,m} \ D_{y,m}]^T$ および入射光を用いて次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 \eta_{x,m} &= \frac{|D_{x,m}|^2}{|E_{x,\text{in}}|^2} = \frac{\sin^2\left\{\frac{\pi(R_{\text{HYB}} - R_{\text{HOME}})}{\lambda}\right\}}{\left(\frac{m\pi}{2}\right)^2} \\
 \eta_{y,m} &= \frac{|D_{y,m}|^2}{|E_{y,\text{in}}|^2} = \frac{0}{\left(\frac{m\pi}{2}\right)^2} = 0
 \end{aligned}$$

回折効率 $\boldsymbol{\eta}_m$ は、領域①と領域②を透過した光の位相差 $|R_{\text{HYB}} - R_{\text{HOME}}| = (2m) \lambda/2 = m\lambda$ の時に最小となり、 $|R_{\text{HYB}} - R_{\text{HOME}}| = (2m - 1) \lambda/2$ の時に最大となる。すなわち、液晶のリタレーションが一波長条件のときに最小、半波長条件のときに最大の回折効率となる。一次回折光 ($m = 1$) の回折効率 η_1 は 40.5% となり、次数が増加するに伴い回折効率は低下する。

$$\begin{aligned}
 \boldsymbol{\eta}_m &= \frac{\sin^2\left(\frac{m\pi}{2}\right)}{\left(\frac{m\pi}{2}\right)^2} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \text{sinc}^2\left(\frac{m\pi}{2}\right) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 \boldsymbol{\eta}_1 &= \begin{bmatrix} \text{sinc}^2\left(\frac{\pi}{2}\right) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.405 \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

3.2.2 光伝搬解析

フレネル回折理論に基づく光伝搬解析

フレネル回折理論に基づく光伝搬解析を用いて位相型フレネルゾーンプレートの光伝搬特性を評価した。レンズの透過関数 $T_{\text{Lens}}(r, \theta)$ は次式で表される。

$$T_{\text{Lens}}(r, \theta) = \exp\left(-j \frac{\pi r^2}{\lambda f}\right)$$

ここで、 r および θ は開口面における極座標系の原点からの距離および方位角を示し、 λ は入射波長、 f は焦点距離を表す。位相型フレネルゾーンプレートの透過関数 $T_{\text{FZP}}(r, \theta)$ は次式で表される。

$$T_{\text{FZP}}(r, \theta) = \begin{cases} 1 & \text{if } (1 - 2m)\pi < \left(\frac{\pi r^2}{\lambda f}\right) < (2 - 2m) \\ \exp(j\pi) & \text{if } (2 - 2m)\pi < \left(\frac{\pi r^2}{\lambda f}\right) < (3 - 2m) \end{cases}$$

ここで、 m は回折次数を表す。透過光 $U(z, \rho, \varphi)$ は次式で与えられる。

$$U(z, \rho, \varphi) = \frac{1}{jz\lambda} \exp\left(j \frac{\pi \rho^2}{z\lambda}\right) \iint T_{\text{FZP}}(r, \theta) \exp\left\{j \frac{\pi}{z\lambda} [r^2 - 2r\rho \cos(\theta - \varphi)]\right\} r dr d\theta$$

ここで、 z および ρ, φ は観測面における極座標系の原点からの距離および方位角、極角を示す。透過光の光強度は、 $I(z, \rho, \varphi) = |U(z, \rho, \varphi)|^2$ で計算できる。

図 3.3 に解析モデルを示す。図 3.3(a)はフレネル回折理論に基づく光伝搬を示し、図 3.3(b)および(c)は、それぞれ入射光の光強度プロファイルおよび開口面における振幅プロファイルを示す。 xy 平面を z 軸方向に伝搬する光を考え、 xy 平面上の位置 $z = 0$ mm に開口面を配置し、観測面を位置 $z = 0.0$ mm から $z = 35.0$ mm まで、 $\Delta z = 0.1$ mm ごとに变化させた。入射光は直径 $643\text{ }\mu\text{m}$ のガウス分布とし、入射波長 550 nm とした。開口面および観測面のグリッドサイズは 2048×2048 、1 グリッドあたりの大きさは $1.8\text{ }\mu\text{m}$ とした。フレネルゾーンの最外輪帯半径 $r_g = 325\text{ mm}$ 、輪帯数 $g = 8$ とした。

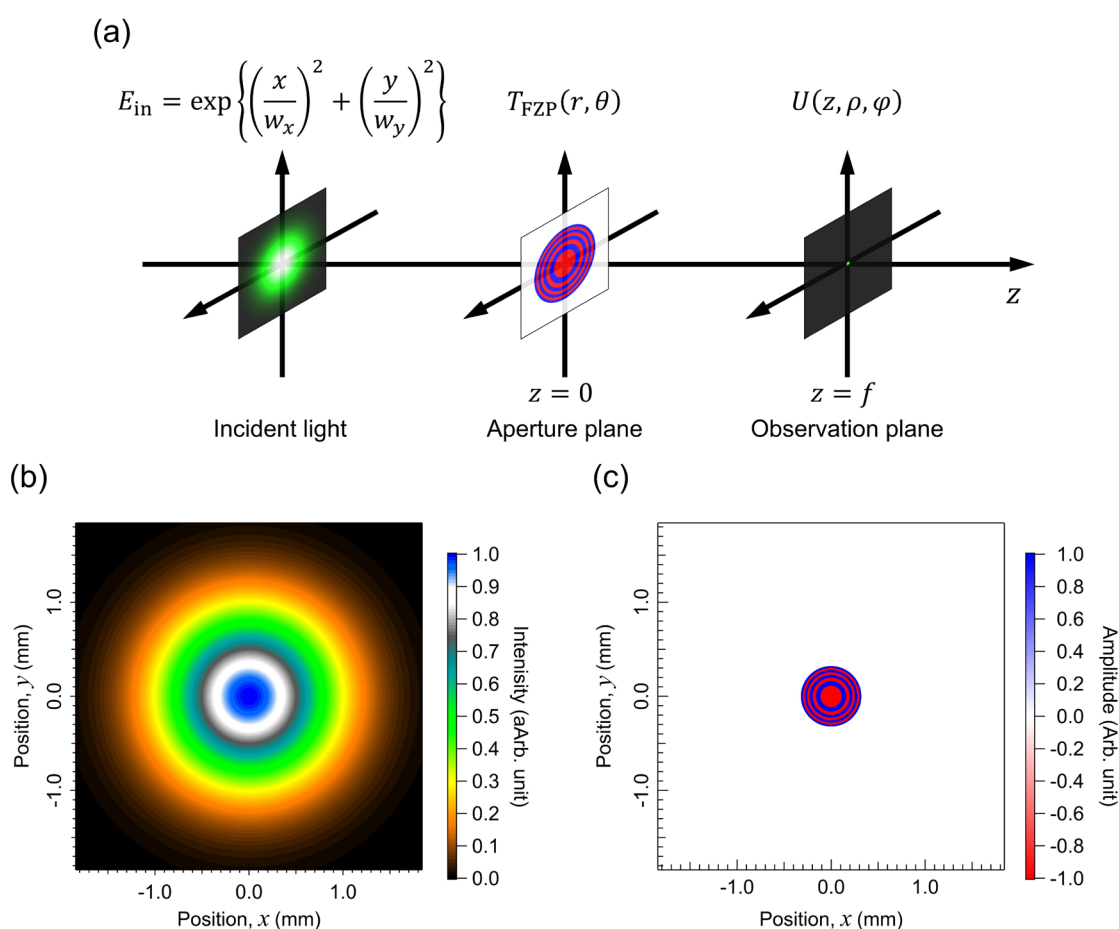


図 3.3 解析モデル：(a) フレネル回折理論に基づく光伝搬、(b) 入射光強度プロファイル、(c) 開口面の振幅プロファイル

解析結果：光強度プロファイル

図 3.4 に回折光の光強度プロファイルを示す。図 3.4(a)および(b)は、それぞれ xy 平面の光強度分布およびビームスポットの中心を通る光強度プロファイルを示す。透過光面内の光強度は、 x 軸および y 軸方向にガウス分布を維持した。 x 軸方向のガウス分布の半値全幅 (full width at half maximum, FWHM) は、 $17.2\ \mu\text{m}$ であった。

図 3.4(c)および(d)は、 zx 平面の光強度分布およびレンズ光軸上に沿った光強度プロファイルを示す。透過光面外の光強度は、伝搬軸 z 上の複数の位置で強まった。これらは高次の回折成分を意味する。一次回折光の焦点距離は $z = 23.5\ \text{mm}$ であった。一次回折光における光軸方向のスポットサイズの広がりをガウス分布でフィッティングした。半値全幅は $4.41\ \text{mm}$ であった。

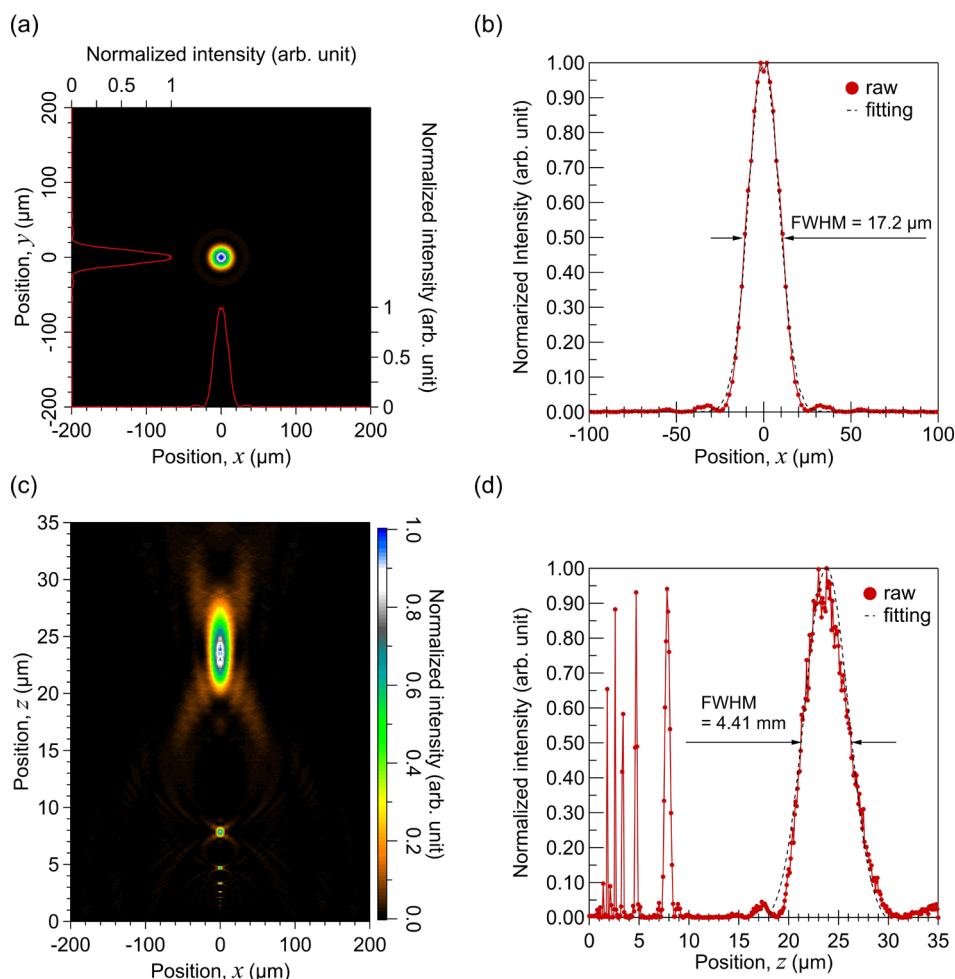


図 3.4 回折光の光強度プロファイル：(a) xy 平面における光強度分布、(b) ビームスポットの中心を通る光強度プロファイル、(c) zx 平面における光強度分布、(d) レンズ光軸に沿った光強度プロファイル

3.3 実験

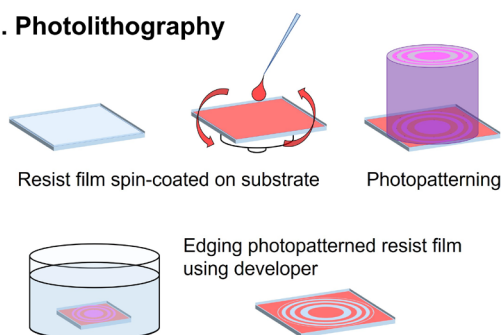
3.3.1 素子作製

作製手法

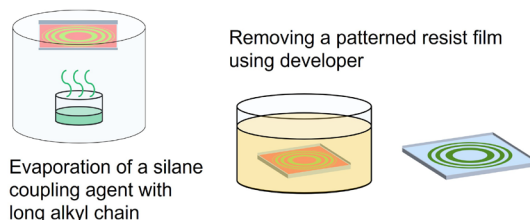
図 3.5 に提案素子の作製方法を示す。作製手順は、以下の 4 工程から成る。次ページ以降に詳しい作製手順を示す。

- ① 電極付きガラス基板にフォトリソレジストを製膜し、フォトリソグラフィ法を用いてレジスト膜をエッチングする。
- ② エッチングしたレジスト基板の上に長鎖アルキルを有するシランカップリング剤を気相蒸着し、レジスト膜を除去する。
- ③ アルキルシラン単分子膜がパターン形成した基板の上に光配向剤を塗布製膜し、直線偏光の紫外線を照射して光配向膜を一様に配向させる。
- ④ 基板全面にアルキルシラン単分子膜が形成した対向基板を用いてサンドイッチ型セルを作製し、液晶を封入する。

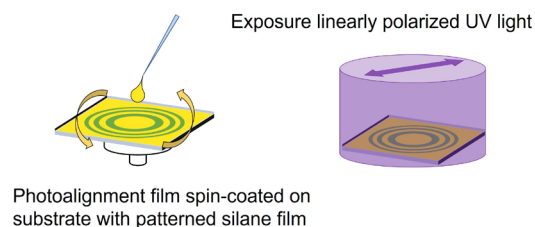
1. Photolithography



2. Formation of hydrophobic layer



3. Formation of hydrophilic layer



4. Fabrication of liquid crystal cell

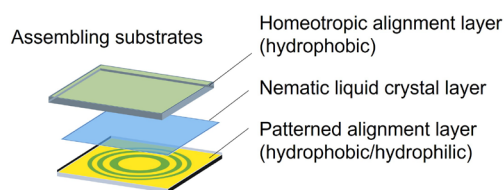


図 3.5 液晶フレネルゾーンプレートの作製方法

① レジスト膜のパターン形成

ITO 電極付きガラス基板 (GEOMATEC, 1006) をアルカリ系洗浄液 (フルウチ化学、セミコクリーン 56) および蒸留水を用いて、それぞれ 5 分および 10 分間超音波洗浄した。エアブローで基板表面に付着した水分を一気に除去した。基板の電極面側にノボラック系ポジ型フォトリソレジスト (東京応化工業、OFPR-800 LB) をスピコートした。スピコート条件は、回転速度 500 rpm で 5 秒および 2000 rpm で 30 秒の 2 段階変速とした。その後、ホットプレート上でレジスト膜を焼成し、レジスト膜に残留する溶媒を除去するとともに膜と基板の密着性を向上させた。焼成温度は 100 度、焼成時間は 15 分間とした。縮小投影型マスクレス露光装置 (図 2.12 参照) を用いて、レジスト膜に紫外線をパターン露光した。露光パターンとして、輪帯数が等しく、直径が異なる 3 種類のフレネルゾーンを設計した。輪帯数は 8 とした。サンプル 1 および 2、3 の直径は、それぞれ 640 μm および 457 μm 、320 μm とした。露光波長は 437 nm、露光強度は約 1.0 mW/cm²、露光時間は 2 秒とした。露光パターンサイズは約 0.9 mm×0.7 mm とした。露光温度は室温 20°C とした。露光後、レジスト膜を温度 100°C で加熱し、光化学反応を抑制した。アルカリ系現像液 (東京応化工業、NMD-3) を用いて、レジスト膜に露光したパターンを現像した。現像温度は 20°C、現像時間は 2 分とした。レジスト膜を現像した基板を蒸留水で十分にリンスし、エアブローで基板表面に付着した水分を一気に除去した。リンスでは、200 ml の蒸留水に 3 分間軽く攪拌しながら浸漬させ、その後、流水で 3 回すすいだ。

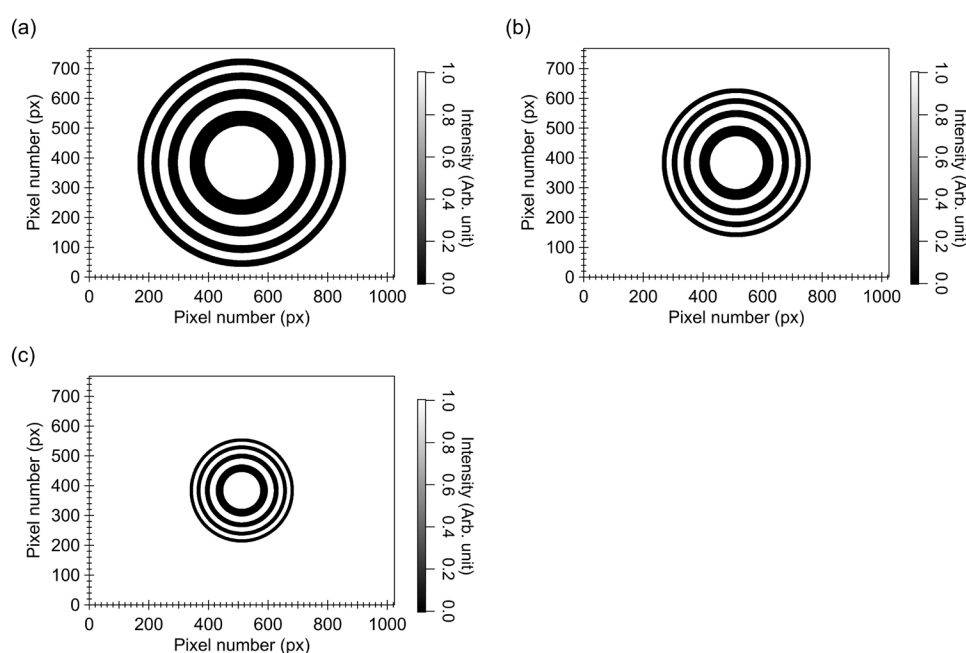


図 3.6 露光パターン：レンズ口径が (a) 700 px、(b) 500 px、(c) 350 px

② パターン化したシラン単分子膜の形成

レジスト膜のパターンを現像した基板面にオクタデシルトリメトキシシラン（東京化成工業、Octadecyltrimethoxysilane）を気相蒸着した。気相蒸着は小型な金属製の真空チャンバー内で行い、チャンバーはホットプレートで加熱した。チャンバーの蓋に基板を設置し、チャンバー内に 2 ml のオクタデシルトリメトキシシラン溶液の入ったシャーレを配置した。チャンバーの加熱温度は 100℃とした。蒸着時間は 60 分とした。アミン系レジスト剥離液（東京応化工業、剥離液 106）にシラン膜を蒸着した基板を浸漬させ、レジスト膜のみ除去した。浸漬時間は 2 分、浸漬温度は 40℃とした。その後、イソプロパノール（ナカライテスク、2-Propanol）および蒸留水で基板をリンスした。アミン系レジスト剥離液は水と反応して強アルカリ性を示し、シラン単分子膜を劣化させるため、先にイソプロパノールを用いてリンスした。リンス後、エアブローを用いて基板を一気に乾燥させた。

③ 光配向膜塗布および配向処理

パターン化したシラン単分子膜が形成した基板面にアゾ系光配向剤（DIC, LIA-03）をスピコートした。スピコートは、回転速度 5000 rpm で 30 秒の 1 段階変速とした。スピコート時、空調等の風による塗布膜の乾燥を防ぐために基板を設置したスピコート台を囲った。スピコート後、基板をスピコート台上で 5 分程度放置し、塗布膜をゆっくりと乾燥させた。この時、塗布膜をゆっくりと乾燥させることで、シラン単分子膜上に塗布された光配向剤が露出した電極面側に濡れ広がって移動し、シラン単分子膜と光配向膜が同一基板表面上で領域分割される。紫外線照射装置（山下電装、HYPERCURE-200）およびフィルム型直線偏光子を用いて、基板に直線偏光の紫外線を照射し、光配向膜を一様に配向させた。照射波長は 365 nm、光強度は 128 mW/cm²、照射時間は 1 分とした。以上により、垂直配向膜と水平配向膜が同一表面上に形成した親液撥液パターンニング基板を作製した。

④ セル作製および液晶封入

基板全面にシラン単分子膜が形成した対向基板を作製した。ITO 電極付きガラス基板（GEOMATEC, 1006）をアルカリ系洗浄液（フルウチ化学、セミコクリーン 56）および蒸留水を用いて、それぞれ 5 分および 10 分間超音波洗浄した。エアブローで基板表面に付着した水分を一気に除去した。基板の電極面にオクタデシルトリメトキシシラン（東京化成工業、Octadecyltrimethoxysilane）を気相蒸着した。チャンバーの蓋に基板を設置し、チャンバー内に 2 ml のオクタデシルトリメトキシシラン溶液の入ったシャーレを配置した。チャンバーの加熱温度は 100℃とした。蒸着時間は 60 分とした。

直径 $9\mu\text{m}$ の球状シリカスパーサー（日揮触媒化学、真絲球）を含んだ紫外線硬化性光学レジン（Norland, NOA68）を用いて、基板全面にシラン単分子膜が形成した対向基板と親液撥液パターンニング基板を貼り合わせた。シリカスパーサーと光学レジンの重量比は、1:100とした。紫外線硬化性光学レジンに紫外線を照射し、基板同士を固着させ、サンドイッチ型セルを作製した。セルにネマティック液晶 E7（LCC, E7）を封入した。封入温度は 70°C とし、室温 25°C まで $1.0^{\circ}\text{C}/\text{min}$ の速度で冷却した。

素子構造の評価

図 3.7 に作製素子の偏光顕微鏡像を示す。図は上から順に、パターン現像後のレジスト膜、液晶素子の対角位および消光位を表す。色の濃い領域がレジスト膜で、薄い領域が露出したガラス面を意味する。サンプル 1 から 3 まで全て露光パターンと同様のフレネルゾーンが得られた。液晶素子においても、露光パターンと同様のフレネルゾーンが得られた。レジスト膜と対角位の偏光顕微鏡像を比較すると、対角位で明るい領域（紫色）はレジスト膜、暗い領域は露出したガラス面に対応し、それぞれの領域に光配向膜およびオクタデシルトリメトキシシラン膜が形成したことが分かる。また、対角位と消光位を比較すると、明暗が変化する領域と常に暗い領域が得られた。このことから、フォトリソグラフィー法を用いて同一基板上に二つの異なる配向膜を領域分割して形成でき、垂直配向領域とハイブリッド配向領域が明瞭に分割できることが分かった。

ハイブリッド配向領域において、隣り合う垂直配向領域間を橋渡しするように複数の配向欠陥が確認された。これは、ハイブリッド配向領域の液晶の立ち上がり方向が 2 パターンあり、これらの回転方向の違いによって生じる^[47]。この欠陥は水平配向膜側の界面にでき、垂直配向領域を経由してループ状の線欠陥である。片方の立ち上がり方向が安定となるように、相転移温度付近で等方相から液晶相まで非常に遅い速度で冷却することで欠陥の数を最小限に抑えることが出来ると考えられる。

回折動作には、垂直配向領域とハイブリッド配向領域を透過する光の位相差が重要となる。欠陥近傍では、1 μm 程度の急激な屈折率の変化が生じるため、光散乱等が生じ、デバイス性能が劣化する恐れがある。今回、作製した素子はセル厚 9 μm 、最小輪体幅は 8 μm 程度であり、欠陥によるデバイス性能の劣化度合いは小さいと考えられるが、さらに微細なパターンを設計した場合、性能劣化が生じる可能性がある。

図 3.8 にサンプル 1 における対角位の画像プロファイルを示す。サンプル 1 では、口径 641.6 μm 、最小輪帯幅 17.2 μm のパターンが得られた。他のサンプルにおいても同様に画像プロファイルを解析した。表 3.1 に作製素子の口径および最小輪帯幅の設計値および実測値を示す。すべての素子において、設計通りのパターンが作製できた。

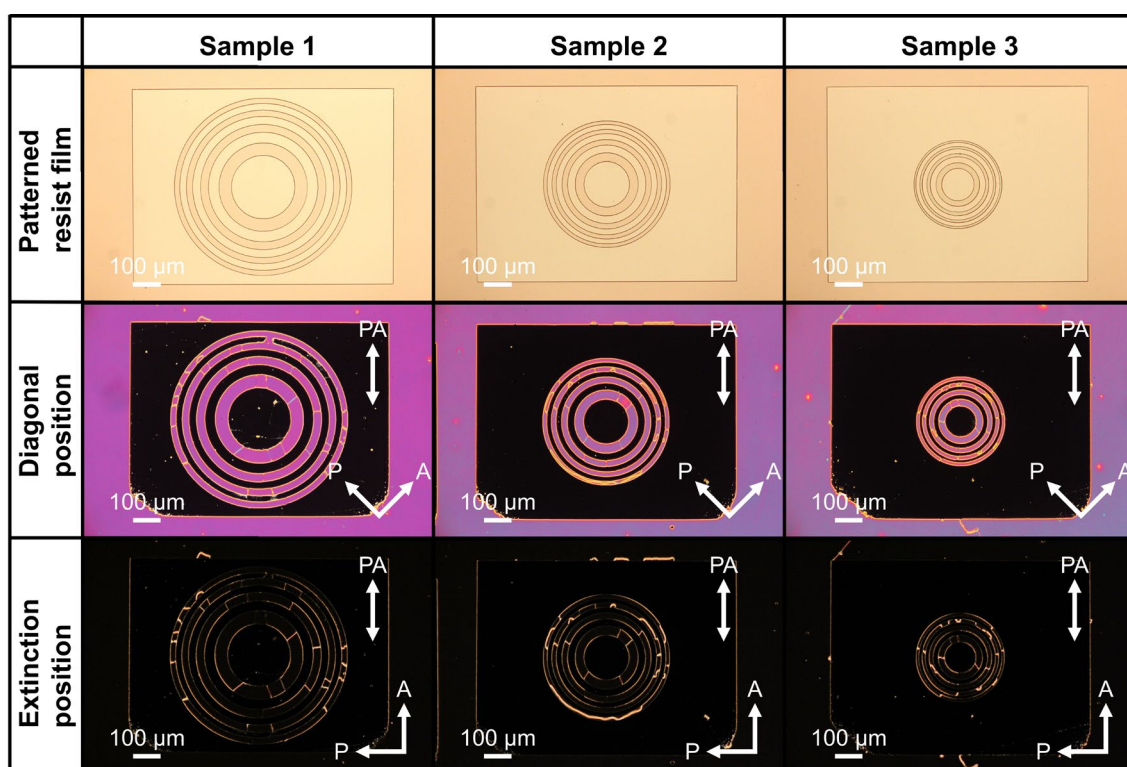


図 3.7 作製素子の偏光顕微鏡像：上から順にパターン現像後のレジスト膜、液晶フレネルゾーンプレートの対角位および消光位（P：偏光子の透過軸、A：検光子の透過軸、PA：光配向膜の容易軸方位）

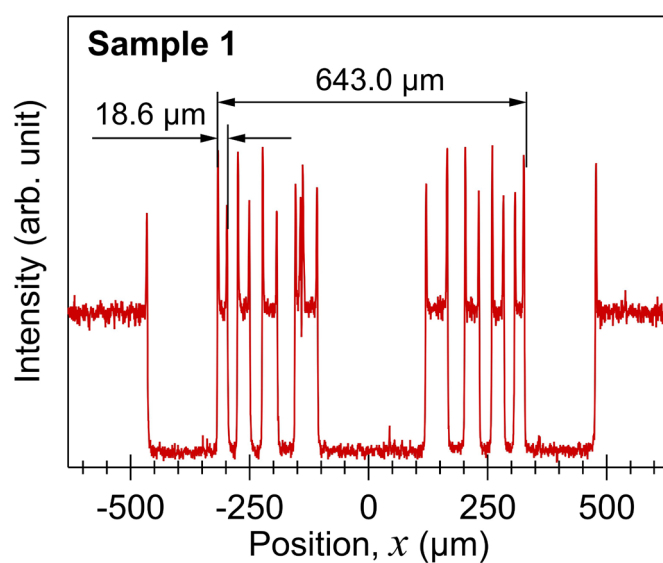


図 3.8 液晶フレネルゾーンプレート（サンプル 1、対角位）の画像プロファイル

表 3.1 液晶フレネルゾーンプレートの口径と最小輪帯幅の設計値と実測値

Number	Sample 1		Sample 2		Sample 3	
Parameter	D_g	Δr	D_g	Δr	D_g	Δr
Design (px)	700	16	500	11	350	8
Design (μm)	641.6	17.2	458.5	12.2	320.1	8.7
Actual (μm)	643.0	18.6	459.3	12.7	321.2	8.9

(diameter of Fresnel zone: D_g , width of ring zone: Δr)

3.3.2 動作実証

回折像観察

図 3.9 に集光スポット観察のために構築した評価光学系を示す。評価光学系は、スーパーコンティニュームレーザー (NKT Photonics, SuperK COMPACT)、円形連続可変型金属 ND フィルター (Thorlabs, NDC-50C-2)、バンドパスフィルター、フィルム型直線偏光子、1/2 波長板、ビームエキスパンダー用の平凸レンズ、サンプルホルダー、マイクロメーターヘッド、ファンクションジェネレーター (Agilent Technologies, Agilent 33500)、小型産業用カメラ (IDS Imaging, UI-3580CP-C-HQ Rev.2) を用いて構築した。

白色レーザーの光強度を ND フィルターで調整し、バンドパスフィルターを用いて中心波長 480 nm および 550 nm、632 nm に変換した。直線偏光子および 1/2 波長板を用いて入射直線偏光方位を調節した。素子口径と同じビーム径を得るために、平凸レンズを 2 枚用いたビームエキスパンダーによりビーム径を縮小した。ビームを素子に垂直入射し、透過光を CMOS イメージングセンサで撮影した。素子に交流矩形波電圧を印加し、回折挙動を評価した。印加電圧は 0 V から 5 V、周波数は 1.0 kHz とした。

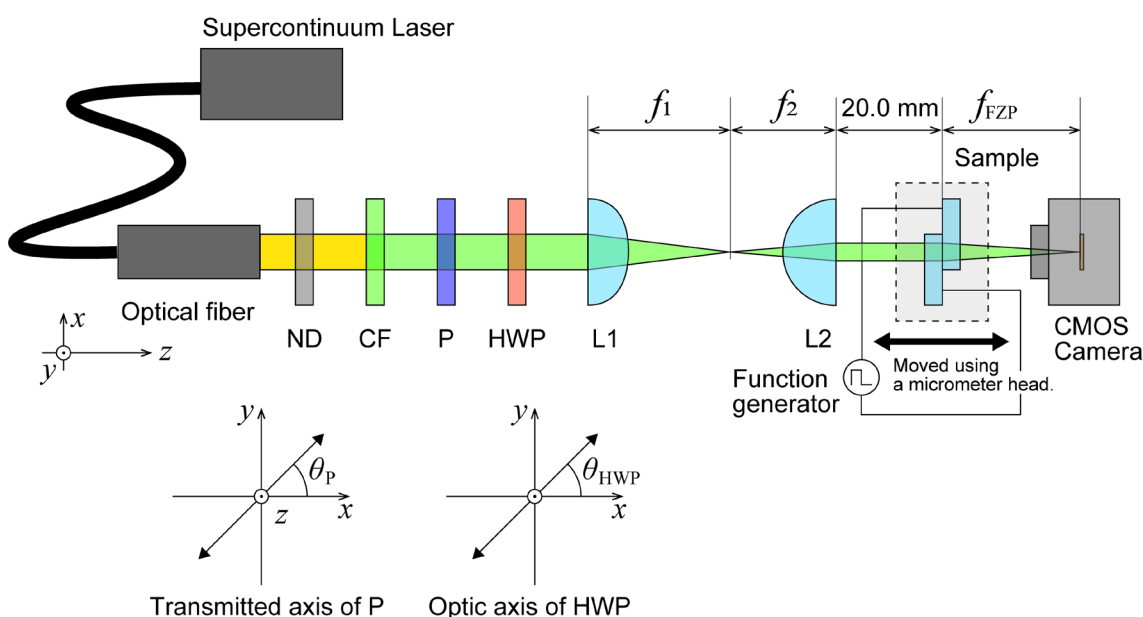


図 3.9 集光スポット観察用に構築した評価光学系

サンプル 1 に波長 550 nm、直径 650 μm のビームを垂直入射し、焦点距離 $z = 22.5 \pm 0.5$ mm で透過光を撮影した。素子への印加電圧は 1.2 V とした。図 3.10 に集光スポットにおける光強度プロファイルを示す。

図 3.10 (a)および(b)は、 xy 平面の光強度分布およびビームスポットの中心を通る光強度プロファイルを示す。ビームスポットの光強度プロファイルは、 x 軸および y 軸方向ともにガウス分布であった。ガウス分布の半値全幅は、 $\text{FWHM} = 25.0 \mu\text{m}$ であった。シミュレーション解析では、ガウス分布の半値全幅は 17.2 μm であり、その誤差率は 30.4%であった。

この誤差の原因は、ビーム径を素子口径まで縮小したことによるビーム発散角の増加が影響したと考えられる。エキスパンドしたビーム径 D_0 は、次式で表せる。

$$D_0 = (M \times D_1) + \{L + \tan(2\theta_1/M)\}$$

ここで、 M は拡大倍率、 D_1 はエキスパンド前のビーム径、 θ_1 はエキスパンド前のビーム発散角、 L はレンズからの距離を表す。ビーム発散角はビームを縮小すると大きくなる。ビーム径 D_0 の第二項目について $L = 45$ mm、 $\theta_1 = 0.5$ mrad と仮定して計算すると、 $M = 1$ のとき、45 μm 、 $M = 0.65$ のとき、69 μm と見積もることができる。これらの比は約 1.5 である。この値からシミュレーションで得られた半値幅を補正すると 25.8 μm となり、実験結果と近い値が得られる。したがって、誤差の原因はビーム径を素子口径まで縮小したことによるビーム発散角の増加が影響したと考えられ、ビーム発散角をより小さくすることで、より小さな集光スポットサイズが得られる。

図 3.10 (c)および(d)は、 zx 平面内の光強度分布およびレンズ光軸上を通る光強度プロファイルを示す。透過光は $z = 23.5$ mm を焦点距離として集光し、この結果はシミュレーション解析で得られた焦点距離と一致した。光軸方向のスポットサイズの拡がりをガウスフィッティングで求めたところ、半値全幅は 5.23 mm であった。シミュレーション結果で得られた半値幅 4.41 mm に対して誤差率は 18.6%であった。誤差の原因は、ビームスポットサイズの誤差と同様に、ビーム径を縮小したことによるビーム発散角の増加が影響したと考えられる。焦点深度、特に奥行き方向は絞り (F 値) が大きくなると増加する傾向にある。 F 値が大きいとビーム発散角も大きくなる。すなわち、ビーム発散角が大きいと奥行き方向の焦点深度が増加する。したがって、レンズ光軸方向のスポットサイズの拡がり誤差は、ビーム発散角の増加が影響したと考えられる。

表 3.2 に入射波長 480 nm、550 nm、632 nm における集光スポットサイズおよび光軸方向のスポットサイズの拡がりを示す。入射波長 480 nm、632 nm においても 550 nm と同様の結果が得られた。

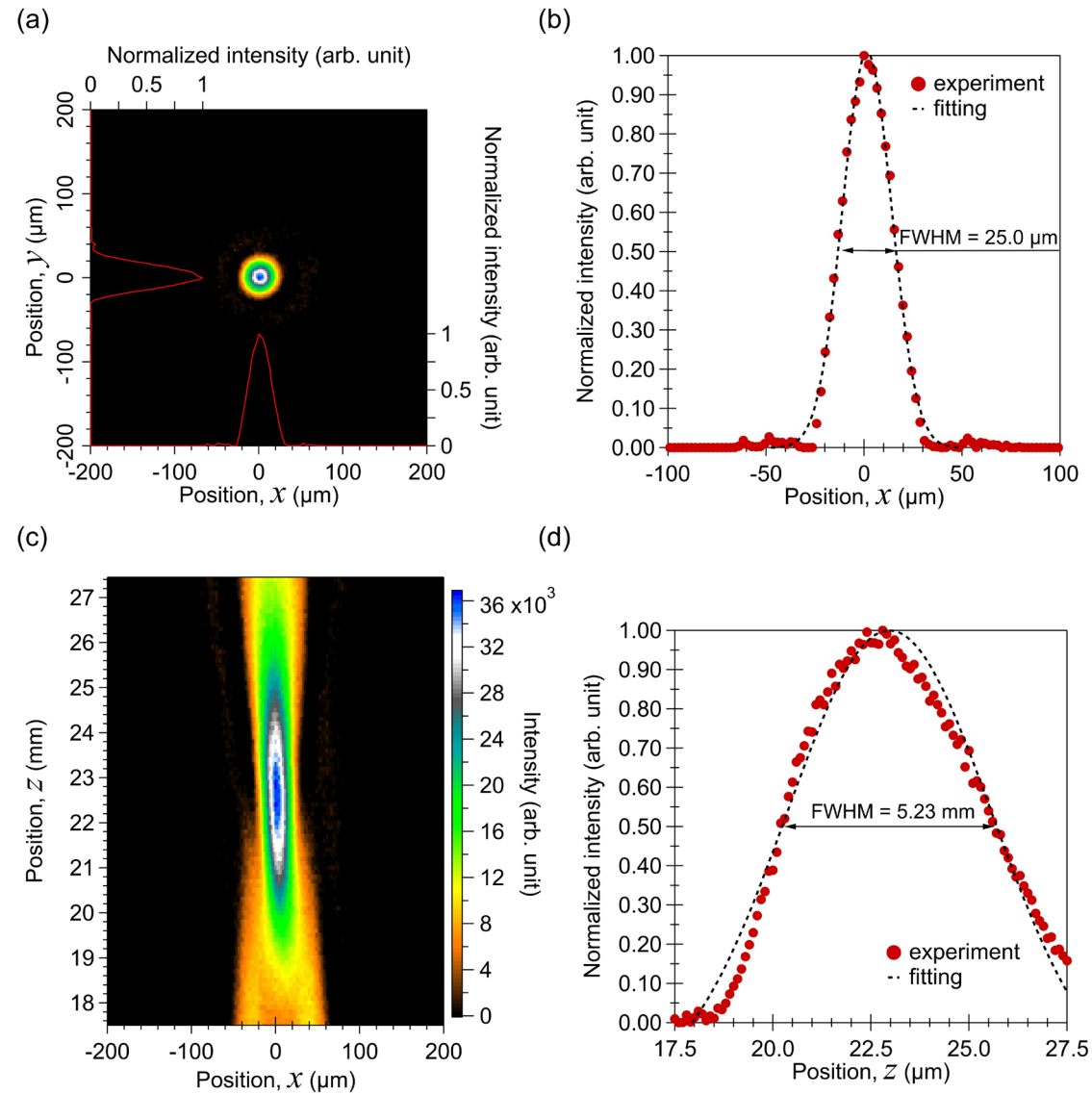


図 3.10 集光スポットにおける光強度プロファイル：(a) xy 面における光強度分布、(b) 中心軸上を通る光強度プロファイル、(c) xz 面における光強度分布、(d) レンズ光軸に沿った光強度プロファイル

表 3.2 可視域における集光スポットおよび光軸方向のスポットサイズの拡がり

Incident wavelength		R (632 nm)	G (550 nm)	B (480 nm)
Size of focusing spot	Simulation	17.3 μm	17.2 μm	17.1 μm
	Experiment	25.5 μm	25.0 μm	33.9 μm
Focal depth	Simulation	3.58 mm	4.41 mm	4.74 mm
	Experiment	3.24 mm	5.23 mm	5.27 mm

回折効率の電圧依存性

提案素子の回折効率は、ハイブリッド領域の液晶のリタレーションが一波長条件の時に最小となり、半波長条件の時に最大となる。図 3.12 に透過率スペクトルの電圧依存性および各入射波長（480 nm および 550 nm、632 nm）のときの透過率の電圧依存性を示す。図は、偏光顕微鏡上で対角位に配置したハイブリッド配向領域の透過率スペクトルを示す。透過率スペクトルは、マルチチャンネル分光器（浜松ホトニクス、C7473-36）を用いて測定した。印加電圧は 0.0 V から 8.0 V とし、スイープする電圧の刻み幅は 10 mV とした。透過率の電圧依存性は、明確なしきい値を持たなかった。この結果は、液晶がハイブリッド配向していることに起因している。入射波長が 550 nm の場合、透過率は印加電圧 0.5 V 付近で最小となり、1.2 V で最大となった。これは電圧印加により液晶の再配向が生じ、ハイブリッド配向領域のリタレーションが変化し、印加電圧 0.5 V で一波長リタレーションの条件となり、1.2 V で半波長リタレーションの条件となったためである。

サンプル 1 に波長 550 nm、直径 650 μm のビームを垂直入射し、焦点距離 $z = 22.5 \text{ mm}$ で透過光を撮影した。素子への印加電圧は 0.0 V から 5.0 V まで変化させた。図 3.13 に集光スポットにおける回折光強度の電圧依存性を示す。回折光強度は印加電圧 0.5 V で最小、1.2 V で最大となり、透過率の電圧依存性と同様の依存性を示した。

ハイブリッド配向領域のリタレーションが一波長条件のとき、ゾーン間の位相差は 2π ラジアンとなり、回折は生じず、回折光強度は最小となる。一方で、ハイブリッド配向領域のリタレーションが半波長条件のとき、ゾーン間の位相差は π ラジアンとなり、最大効率で回折が生じ、回折光強度は最大となる。したがって、回折光強度の電圧依存性は次のように解釈できる。電圧印加によりハイブリッド配向領域の液晶が再配向し、リタレーションが変化する。垂直配向領域およびハイブリッド配向領域のゾーン間で生じる位相差が変調される。ゾーン間の位相差が変調されると位相回折条件が変化するため、回折光強度が変化する。

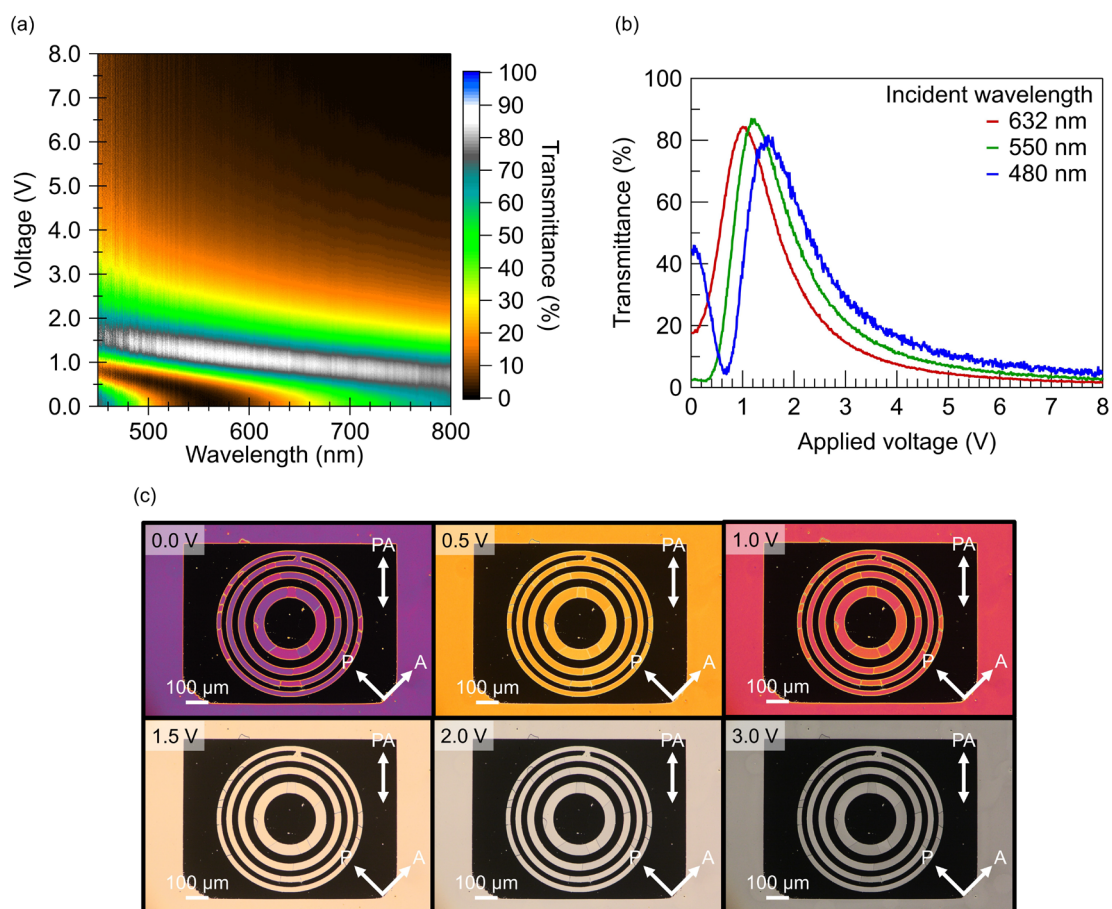


図 3.11 ハイブリッド配向領域における透過率スペクトルの電圧依存性：(a) 透過率スペクトルの電圧依存性、(b) 各入射波長（480 nm および 550 nm、632 nm）における透過率の電圧依存性、(c) 電圧印加時の偏光顕微鏡像

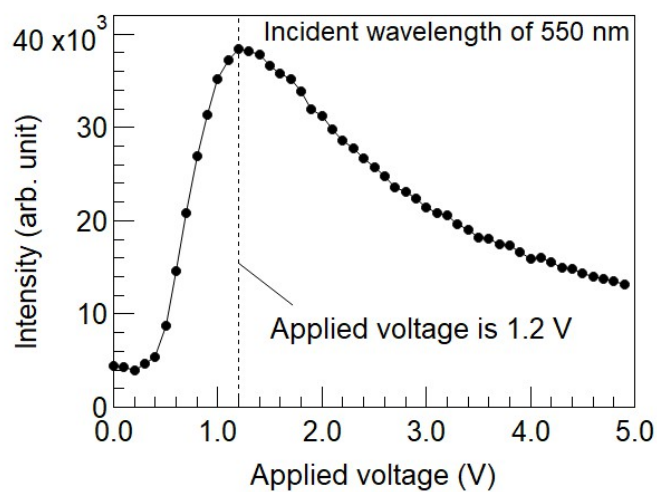


図 3.12 集光スポットにおける光強度の電圧依存性

回折効率の偏光依存性

サンプル 1 に波長 550 nm、直径 650 μm の直線偏光を垂直入射し、カメラ位置 $z = 20\text{ cm}$ で透過光を撮影した。このとき、入射直線偏光方位を 0 度から 360 度まで変化させた。素子への印加電圧は 1.2 V とした。図 3.16 に回折光の偏光依存性を示す。図 3.16(a) は入射直線偏光方位をハイブリッド配向方位に対して平行および垂直としたときの透過光観察像を示す。入射直線偏光方位がハイブリッド配向方位に対して平行の場合、透過光は集光した。一方で入射直線偏光方位がハイブリッド配向方位に対して垂直の場合、透過光は集光されずにそのまま直進した。これは、入射直線偏光方位がハイブリッド配向方位に対して垂直の場合、透過光は隣り合ったゾーンどちらにおいても常光屈折率を感じ、位相差が生じないためである。したがって、入射直線偏光方位を 90 度変化させることで集光と非集光状態をスイッチングできることが分かった。

図 3.16(b) は回折光強度の偏光依存性を示す。ハイブリッド配向方位方向を入射直線偏光方位 0 度とした。回折光強度は入射直線偏光方位に依存して変化し、正弦波を二乗した関数で示され、理論通りの入射偏光依存性が得られた。

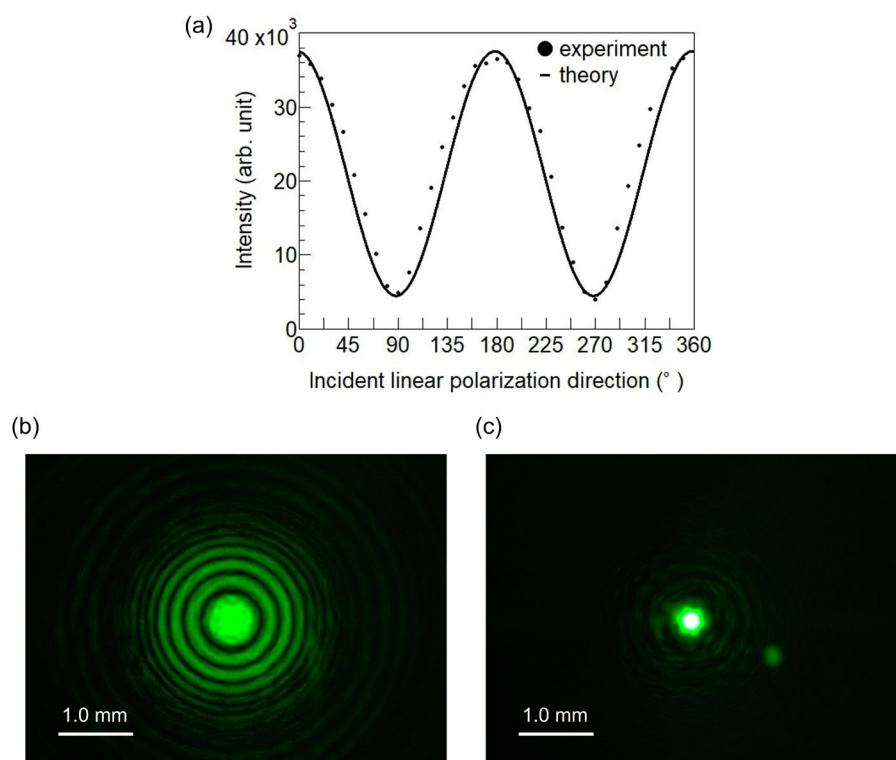


図 3.13 回折光の偏光依存性：(a) 集光スポットにおける透過光強度の入射偏光依存性、入射直線偏光方位が光配向膜の配向容易軸方位に対して(b) 垂直および(c) 水平としたときの透過光像

回折効率の算出

一次回折光 P_1 およびバックグラウンド P_b 、入射光の光強度 P_{in} を測定し、次式を用いて回折効率 η を算出した。

$$\eta = \frac{(P_1 - P_b)}{P_{in}}$$

光強度の測定には、パワーメーター（Ophir Optronics Solutions, Vega: 7Z01560）を用いた。測定波長は 550 nm とした。サンプル 1 および 2, 3 の回折効率は、それぞれ 34.4% および 33.4%、33.5% であった。位相型フレネルゾーンの回折効率の理論値は 40.5% であり、実験結果は理論値よりも 5.6-6.6% 低い値となった。その主な原因として、基板でのフレネル反射損失が考えられる。また、液晶の配向欠陥で生じる光散乱も損失の原因として考えられるが、フレネル反射損失が 5% 程度と仮定してもその影響は十分に小さいと見積もることができる。したがって、非常に高い回折効率が得られることが分かった。

焦点距離の波長依存性

作製素子に波長 480 nm および 550 nm、632 nm のビームを垂直入射し、波長ごとの焦点距離を測定した。図 3.14 に焦点距離の波長依存性を示す。表 3.3 に焦点距離の理論値と実測値を示す。得られた焦点距離は理論値と良い一致を示し、理論通り、入射波長に対して反比例した。波長帯域 480 nm から 632 nm おける焦点距離の変化量は、サンプル 1 および 2、3 でそれぞれ 5.2 mm、2.4 mm、1.6 mm であった。

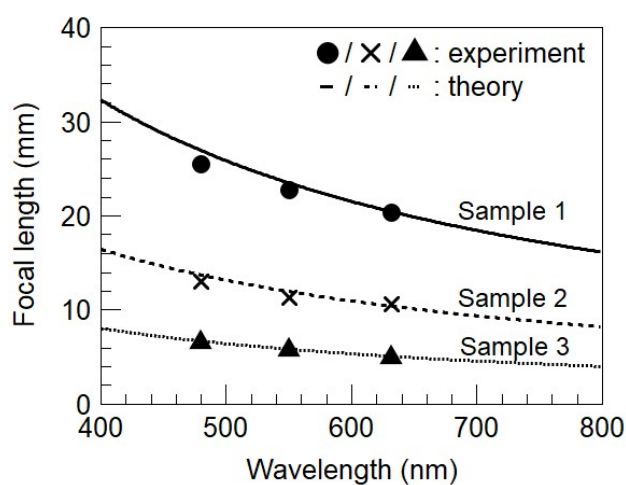


図 3.14 焦点距離の波長依存性

表 3.3 焦点距離の理論値と実測値

Incident wavelength		480 nm	550 nm	632 nm
Sample 1	Theoretical	26.9 mm	23.5 mm	20.4 mm
	Experimental	25.5 mm	22.8 mm	20.3 mm
Sample 2	Theoretical	13.7 mm	12.0 mm	10.4 mm
	Experimental	13.0 mm	11.3 mm	10.6 mm
Sample 3	Theoretical	6.7 mm	5.9 mm	5.1 mm
	Experimental	6.5 mm	5.7 mm	4.9 mm

焦点距離の電圧依存性

入射波長 480 nm および 550 nm、632 nm において最大の回折光強度が得られる印加電圧は、それぞれ 1.0 V および 1.2 V、1.4 V で液晶のリタレーションが半波長条件を満たすときであった。図 3.15 に焦点距離の電圧依存性を示す。焦点距離は印加電圧の増加に対して長くなることが分かった。サンプル 1 では、印加電圧が 1.0 V から 1.4 V まで変化させると焦点距離が 25.5 mm から 20.3 mm まで変化した。その焦点距離の電圧感度は $13.0 \mu\text{m}/\text{mV}$ であった。サンプル 2 では、印加電圧が 1.0 V から 1.4 V まで変化させると焦点距離が 10.6 mm から 13.0 mm まで変化した。焦点距離の電圧感度は $6.0 \mu\text{m}/\text{mV}$ であった。た。サンプル 3 では、印加電圧が 1.0 V から 1.4 V まで変化させると焦点距離が 4.9 mm から 6.5 mm まで変化した。したがって、印加電圧がミリボルトオーダーで焦点距離がマイクロメートルオーダーで変調できることを実証した。

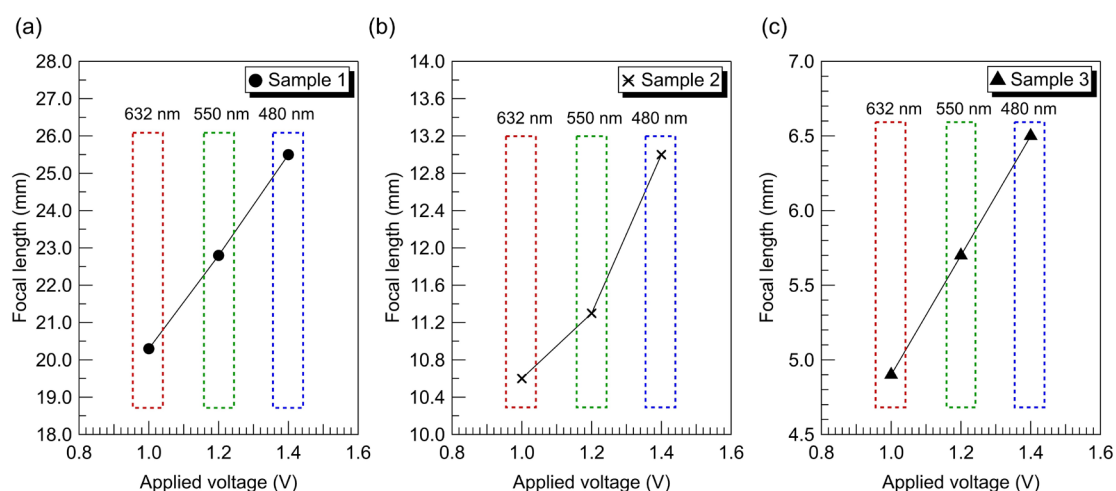


図 3.15 焦点距離の電圧依存性：(a) サンプル 1、(b) サンプル 2、(c) サンプル 3

3.4 結言

本研究では、界面環境のパターン設計に基づく液晶波面制御デバイスの高機能化を目的とし、フォトリソグラフィ法を用いて濡れ性の異なる二つの配向膜を同一基板上に塗分け親液撥液パターニング法を開発した。開発したパターニング手法を用いて液晶フレネルゾーンプレートを作製し、従来の液晶レンズに比べて大幅な駆動電圧の低減および精密な焦点距離制御を実現した。本研究に依って得られた知見を以下に要約する。

1. 隣り合ったゾーンで垂直配向および水平配向が交互に配置した液晶フレネルゾーンプレートを提案した。提案素子に白色光を入射すると位相回折条件を満たす波長で集光スポットが形成され、素子への電圧印加により位相回折条件を変調することで集光スポット位置、すなわち焦点距離が変調できることを示した。
2. フレネル回折理論に基づく光伝搬解析を用いて、設計した素子の光伝搬特性を評価した。直径 650 μm 、波長 550 nm のガウシアンビームを口径 650 μm 、輪帯数 8 のフレネルゾーンに入射すると、一次回折光は焦点距離 23.5 mm で集光した。面内の集光スポットサイズおよび光軸方向の集光スポットサイズの半値全幅は、それぞれ 17.4 μm 、4.41 mm であった。
3. フォトリソグラフィ法を用いて濡れ性の異なる二つの配向膜を同一基板上に塗分ける親液撥液パターニング法を開発し、液晶の配向制御を提案した。以下に手順を示す。
(ア) 電極付きガラス基板にフォトレジストを製膜し、フォトリソグラフィ法を用いてレジスト膜をエッチングする。
(イ) エッチングしたレジスト基板上に長鎖アルキルを有するシランカップリング剤を気相蒸着し、レジスト膜を除去する。
(ウ) アルキルシラン単分子膜がパターン形成した基板上に光配向剤を塗布製膜し、直線偏光の紫外線を照射して光配向膜を一様に配向させる。
(エ) 基板全面にアルキルシラン単分子膜が形成した対向基板を用いてサンドイッチ型セルを作製し、液晶を封入する。
4. 親液撥液パターニング法を用いて、口径の異なる 3 種類の液晶フレネルゾーンプレートを作製した。口径が数百マイクロメートル、最小輪帯幅が数から十数マイクロメートルを達成し、全て設計通りに作製できた。
5. 回折像を観察する評価光学系を構築し、作製素子の集光特性を評価した。以下に、評価項目ごとの集光特性を示す。

- (ア) 集光スポットサイズおよび光軸方向の集光スポットの拡がり、フレネル回折理論に基づく光伝搬解析結果と比較すると概ね良い一致を示した。
- (イ) 回折光強度が印加電圧に依存して変化した。回折光強度の電圧依存性は次のように解釈できる。電圧印加によりハイブリッド配向領域の液晶が再配向し、リタデーションが変化する。これにより垂直配向領域およびハイブリッド配向領域のゾーン間で生じる位相差が変調され、位相回折条件が変化し、回折光強度が変化する。
- (ウ) 作製素子の回折効率は約 34% で理論値 40.5% よりも若干低い値を示したが、フレネル反射損失を考慮すれば十分に高い効率が得られた。
- (エ) 焦点距離は理論通りの特性を示した。駆動電圧は数ボルトを達成した。ミリボルトオーダーの電圧印加でマイクロメートルオーダーの焦点距離制御が可能であることを実証した。
- (オ) 回折光強度は入射直線偏光方位に依存して変化する、正弦波を二乗した関数で示され、理論通りの入射偏光依存性が得られた。

第4章 親液撥液パターンニングを用いた液晶スパイラルゾーンプレートによる集光光渦生成

4.1 緒言

集光した光渦はレーザープロセッシング^[65, 80, 148]や光マニピュレーション^[102]、光通信^[53, 57]、イメージング^[149–152]等の幅広い光学分野で応用が期待されている^[75, 153]。かしながら、集光光渦の生成には、通常、光渦生成素子とレンズ素子を組み合わせる必要があり、光渦の位相特異点とレンズ光軸を一致させることが困難であった。この課題に対して、スパイラルゾーンプレート（spiral zone plate, SZP）と呼ばれる回折光学素子が注目されている^[154]。スパイラルゾーンプレートは、螺旋位相プロファイルとレンズ状位相プロファイルを重ね合わせた位相プロファイルを有し、光渦の位相特異点とレンズ光軸が完全に一致した集光光渦生成が可能である。また、スパイラルゾーンプレートは単一素子構成で集光した光渦を生成できるため、複数の光学素子を用いる従来手法よりもシステムサイズをコンパクトにできる。さらに、基板上にアレイ化することも可能であるため、マイクロレンズアレイを用いた光ピンセット^[155–158]や光通信^[159]、顕微イメージング^[160]などへの応用が期待できる。したがって、スパイラルゾーンプレートを用いた集光光渦の生成は将来、応用上で重要な役割を果たすと考えられる。

スパイラルゾーンプレートは、これまでに様々な手法で作製されてきた。レーザー^[161]や電子ビーム^[151, 162]、集光イオンビーム^[163, 164]等を用いた場合、ナノオーダーの高精細なパターン形成が可能であるが^[23]、回折動作は振幅変調に基づくため、理論効率が 20%程度と低かった。3D プリンティングを用いたスパイラルゾーンプレートの回折動作は、位相変調に基づくため、振幅型回折素子に比べて高い効率が得られる^[165]。しかしながら、これらの作製手法はナノからマイクロメートルスケールの高い空間分解能でミリメートルスケール以上のパターンを直接描画する必要があるため、デバイス作製に時間がかかるという課題があった。したがって、より簡便に位相型デバイスを作製する技術が求められている。

位相変調に基づいて動作するデバイスのひとつに空間光変調器がある^[84, 166]。空間光変調器はコンピューターホログラム計算を用いて位相プロファイルを形成することができ、位相型スパイラルゾーンプレートと同様に高い効率で集光光渦の生成が可能である。しかしながら、空間光変調器を用いた場合、システムサイズが大型化し、用途が制限される。また導入コストが高いという欠点がある。

そこで本研究では、親液撥液パターンニングを用いた液晶スパイラルゾーンプレートを提案し、光渦の位相特異点とレンズ光軸が一致した集光光渦生成を実証し、振幅型に比べて約2倍の効率向上を達成した。また、親液撥液パターンニングは投影露光フォトリソグラフィを応用した液晶配向制御法であり、一括露光で配向パターンニング可能でマイクロメートルスケールの微細パターンを容易に作製可能なことを明らかにした。

4.2 原理

4.2.1 提案素子

素子構造

図 4.1 に提案素子の構造を示す。図 4.1(a)はスパイラルゾーンプレートが有する幾何学パターンを表す。スパイラルゾーンとは、螺旋位相プロファイルとレンズ位相プロファイルを重ね合わせた位相プロファイルを二値化した幾何学パターンで、中心点から螺旋状に放射した複数のアームを有する。スパイラルゾーンは螺旋軸とレンズ光軸は一致しているため、位相特異点と集光軸が一致した集光光渦が生成されることとなる。

提案素子は誘電異方性が正のネマティック液晶層、垂直配向膜が塗布した電極付きガラス基板、垂直配向膜及び水平配向膜が塗布した電極付きガラス基板で構成される。同一基板上に塗布された垂直配向膜および水平配向膜によって、スパイラルゾーン状の液晶配向パターンが形成される。

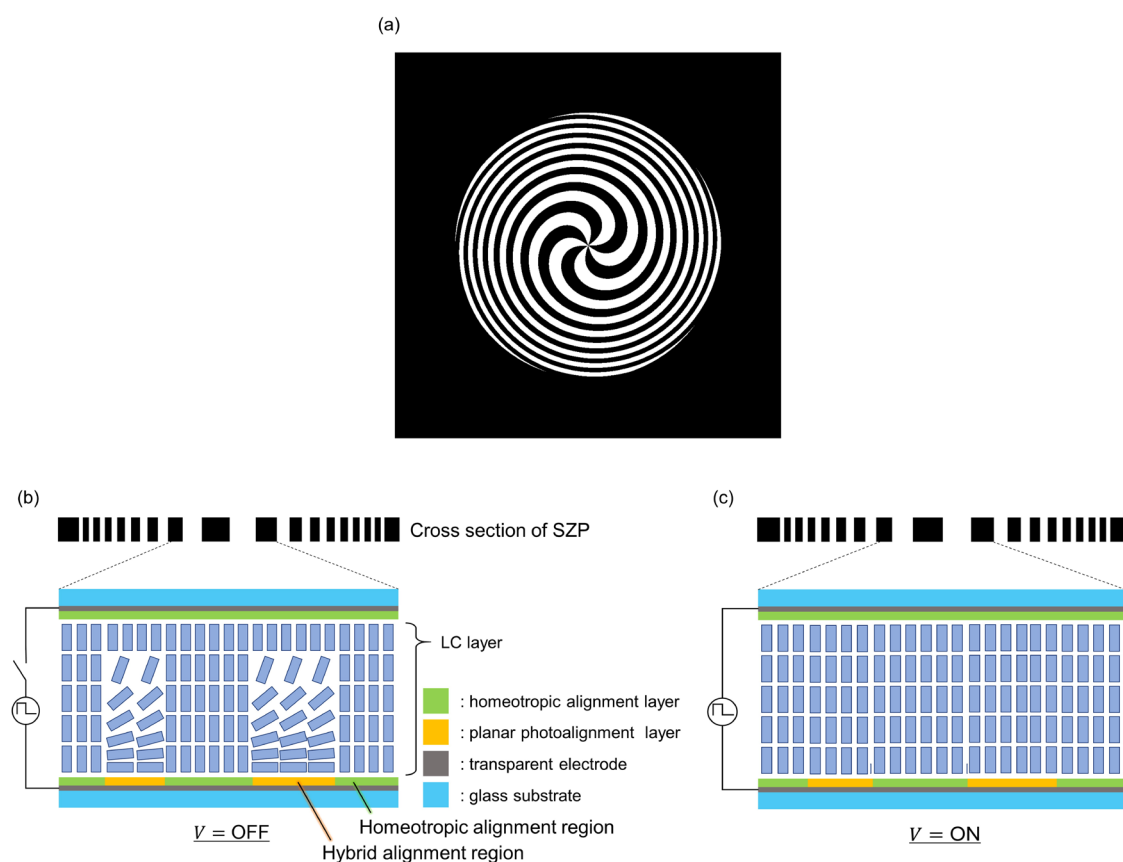


図 4.1 提案素子の構造：(a) 電圧無印加時の配向状態、(b) 電圧印加時の配向状態

図 4.1(b)に電圧無印加時の液晶の配向状態を示す。液晶は、隣り合ったゾーン（輪帯）で交互に垂直配向とハイブリッド配向を示す。ハイブリッド配向方位は基板全面で一様である。図 4.1(c)に電圧印加時の液晶の配向状態を示す。基板間に電圧を印加すると、垂直配向領域の液晶は電場方向に対してすでに平行なため、垂直配向を維持する。一方で、ハイブリッド配向領域の液晶は電場方向に対して平行に再配向し、徐々に垂直配向となる。この配向変化に応じて、垂直配向領域を透過した光の位相とハイブリッド配向領域を透過した位相の位相差が変調され、位相回折条件が変調される。したがって、素子に電圧を印加すると特定波長における回折効率が変調できる。また、同様に動作波長を変調することもできる。

動作原理

図 4.2 にスパイラルゾーンプレートが有する位相プロファイルを示す。図 4.2(a)および (b)、(c)は、それぞれ螺旋位相プロファイルおよびレンズ位相プロファイル、螺旋位相プロファイルおよびレンズ位相プロファイルを重ね合わせた位相プロファイルを示し、図 4.2(d) はスパイラルゾーンプレートの位相プロファイルを示す。フレネル回折理論によれば、螺旋状の位相パターンの透過関数 T_{vortex} とレンズ状の位相パターンの透過関数 T_{lens} は次式で与えられる。

$$T_{\text{vortex}}(r, \theta) = \exp(j\ell\theta),$$

$$T_{\text{lens}}(r, \theta) = \exp\left(-j\frac{\pi r^2}{\lambda f}\right)$$

ここで、 r および θ は開口面における極座標系の原点からの距離および方位角を示し、 ℓ は螺旋位相プロファイルのトポロジカルチャージ、 λ は入射波長、 f は焦点距離を示す。なお、 j は虚数単位を表す。螺旋位相プロファイルとレンズ位相プロファイルを重ね合わせた位相パターンの透過関数 T_{spiral} は次式となる。

$$T_{\text{spiral}}(r, \theta) = T_{\text{vortex}}(r, \theta)T_{\text{lens}}(r, \theta)$$

$$= \exp\left[j\left(\ell\theta - \frac{\pi r^2}{\lambda f}\right)\right]$$

スパイラルゾーンの透過関数は螺旋軸とレンズ光軸が一致している。したがって、スパイラルゾーンを透過した光は、位相特異点とレンズの光軸が同軸上にある集光光渦となる。螺旋位相プロファイルとレンズ位相プロファイルを重ね合わせた位相プロファイルを二値化するとスパイラルゾーンプレートの位相プロファイルが得られ、その透過関数 T_{SZP} は次式で与えられる。

$$T_{\text{SZP}}(r, \theta) = \begin{cases} 1 & \text{if } (1 - 2m)\pi < \left(\ell\theta - \frac{\pi r^2}{\lambda f}\right) < (2 - 2m) \\ \exp(j\pi) & \text{if } (2 - 2m)\pi < \left(\ell\theta - \frac{\pi r^2}{\lambda f}\right) < (3 - 2m) \end{cases}$$

ゾーン間で生じる透過位相差が π ラジアンするとき、最大効率で透過光が回折する。

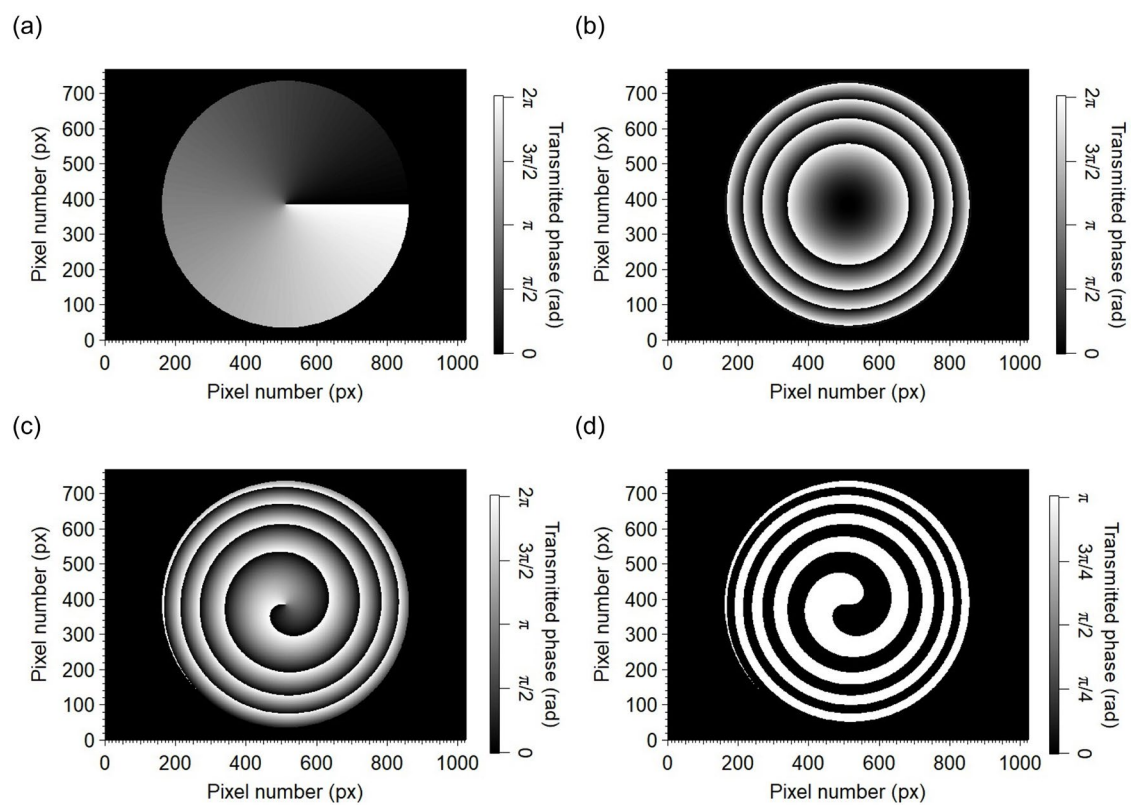


図 4.2 スパイラルゾーンに含まれる各位相パターン：(a) 螺旋位相プロファイル、(b) レンズ位相プロファイル、(c) 螺旋位相プロファイルとレンズ位相プロファイルを重ね合わせた位相プロファイル、(d) スパイラルゾーンプレートの位相プロファイル

液晶スパイラルゾーンプレートは、ゾーンごとに垂直配向と水平配向が交互に配置している。入射直線偏光方位がハイブリッド配向方位と等しいとき、ゾーン間で生じる透過位相差は $\Delta\phi = \exp\left[j2\pi\left\{\int_{z=0}^d n_e(z)dz - n_o\right\}d/\lambda\right]$ となる。ここで、 n_o および n_e は液晶の常光屈折率および異常光屈折率を表し、 d は液晶層の厚さを表す。文字を簡単にするため、素子の実効的なリタデーション $\left\{\int_{z=0}^d n_e(z)dz - n_o\right\}d$ を $\Delta n_{hy}d$ として記述する。液晶スパイラルゾーンプレートの透過関数 T_{LCSZP} は、次式となる。

$$T_{\text{LCSZP}}(r, \theta) = \begin{cases} 1 & \text{if } (1-2m)\pi < \left(\ell\theta - \frac{\pi r^2}{\lambda f}\right) < (2-2m)\pi \\ \exp\left(j\frac{2\pi\Delta n_{hy}d}{\lambda}\right) & \text{if } (2-2m)\pi < \left(\ell\theta - \frac{\pi r^2}{\lambda f}\right) < (3-2m)\pi \end{cases}$$

液晶スパイラルゾーンプレートを伝搬した光が感じる実効的な複屈折率は印加電圧に依存して変化する。よって、ゾーン間で生じる透過位相差は印加電圧によって変調可能である。平面波がスパイラルゾーンプレートに垂直入射した場合、透過光 $U(z, \rho, \varphi)$ は次式で与えられる。

$$U(z, \rho, \varphi) = \frac{1}{jz\lambda} \exp\left(j\frac{\pi\rho^2}{z\lambda}\right) \iint T_{\text{LCSZP}}(r, \theta) \exp\left\{j\frac{\pi}{z\lambda}[r^2 - 2r\rho\cos(\theta - \varphi)]\right\} r dr d\theta$$

ここで、 z および ρ, φ は観測面における極座標系の原点からの距離および方位角、極角を示す。透過光の光強度は、 $I(z, \rho, \varphi) = |U(z, \rho, \varphi)|^2$ で計算できる。この式は、高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform) を用いて計算できる^{[167][168]}。

液晶スパイラルゾーンプレートの焦点距離 f_{LCSZP} は、次式で与えられる。

$$f_{\text{LCSZP}} = \frac{r_g^2}{gm\lambda}$$

ここで、 r_g は液晶スパイラルゾーンプレートの半径、 g はレンズ状位相プロファイルのラップ数、 m は回折次数、 λ は入射波長を表す。焦点距離はフレネルゾーンプレートと同じ式で与えられる。

4.2.2 光伝搬解析

フレネル回折理論に基づく光伝搬解析

フレネル回折理論に基づく光伝搬解析を用いて、素子の光伝搬特性を評価した。図 4.3 に解析モデルを示す。図 4.3(a)および(b)は、それぞれ入射光強度プロファイルおよび位相型スパイラルゾーンプレートの振幅プロファイルを示す。入射光として、波長 532 nm、直径 10 mm のガウシアンビームを用いた。開口面には、口径 1.27 mm、螺旋位相プロファイルのトポロジカルチャージ 5、焦点距離は 46.6 mm の位相型スパイラルゾーンプレートを配置した。開口面および観測面のグリッドサイズは 1024×1024 とし、1 グリッドあたりの大きさは 1.8 μm とした。 xy 平面を z 軸方向に伝搬する光を考え、 xy 平面上の位置 $z = 0.0$ mm に素子を配置し、観測面を位置 $z = 0.0$ mm から $z = 100.0$ mm まで、 $\Delta z = 0.1$ mm ごとに变化させた。

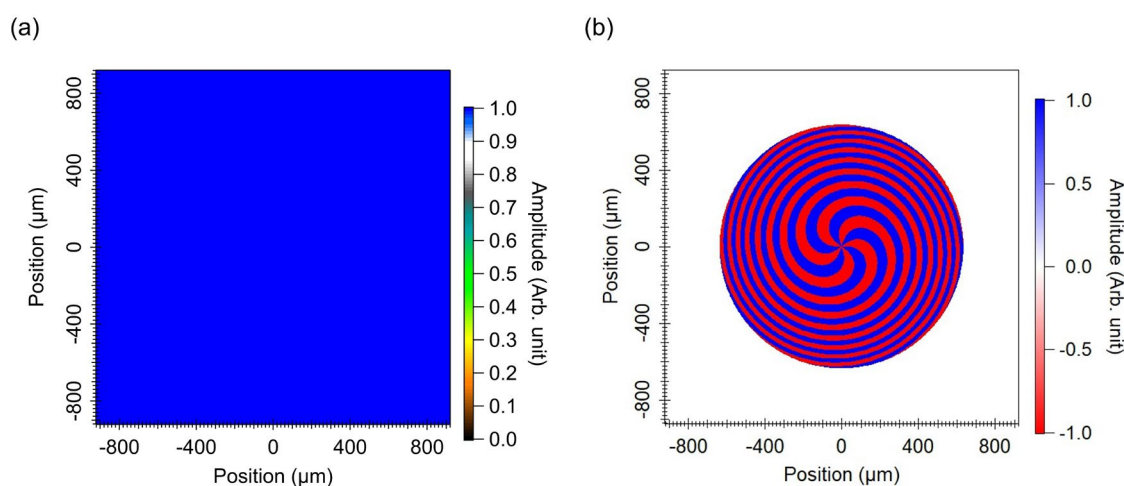


図 4.3 解析モデル：(a) 入射光強度プロファイル、(b) 位相型スパイラルゾーンプレートの振幅プロファイル

解析結果：光強度プロファイル

図 4.4 に得られた光強度プロファイルを示す。図 4.4(a)は焦点距離における回折光強度プロファイルを示す。回折光はドーナツ状光強度分布となった。ドーナツ穴の中央では光強度が完全にゼロになった。ドーナツ状光強度分布は動径方向 (x および y 軸方向) に等しかった。ドーナツ径 (ドーナツ状光強度の山と山の幅) は約 $95.4\text{ }\mu\text{m}$ であることが分かった。素子の NA は 0.0136、開口サイズは 1.27 mm で十分に集光した光渦が生成できることが分かった。

図 4.4(b)はレンズ光軸方向の回折光強度プロファイルを示す。回折光は焦点距離付近で強く集光した。回折光中央の光強度は伝搬軸方向に沿って常にゼロであった。したがって、位相特異点とレンズ光軸が一致した集光光渦が生成されることがわかった。

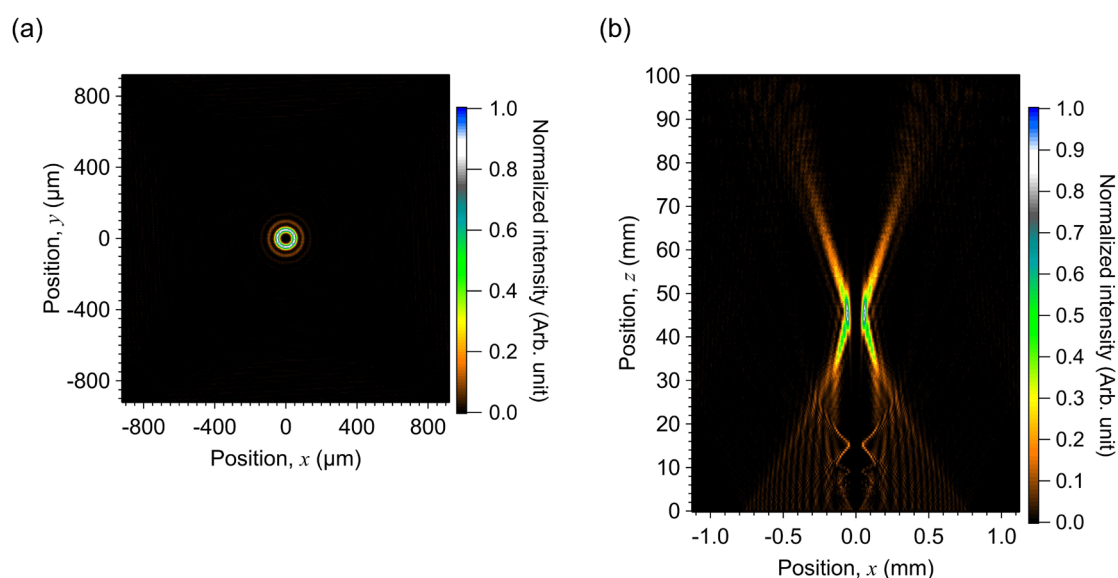


図 4.4 回折光強度プロファイル:(a) 焦点距離における光強度プロファイル、(b) レンズ光軸方向の光強度プロファイル

4.3 実験

4.3.1 素子作製

親液撥液パターニング法を用いて、液晶スパイラルゾーンプレートを作製した。以下に、素子作製の詳しい手順を示す。

① レジスト膜のパターン形成

ITO 電極付きガラス基板 (GEOMATEC, 1006) をアルカリ系洗浄液 (フルウチ化学、セミコクリーン 56) および蒸留水を用いて、それぞれ 5 分および 10 分間超音波洗浄した。エアブローで基板表面に付着した水分を一気に除去した。基板の電極面側にノボラック系ポジ型フォトリソレジスト (東京応化工業、OFPR-800 LB) をスピコートした。スピコート条件は、回転速度 500 rpm で 5 秒および 2000 rpm で 30 秒の 2 段階変速とした。その後、ホットプレート上でレジスト膜を焼成し、レジスト膜に残留する溶媒を除去するとともに膜と基板の密着性を向上させた。焼成温度は 100 度、焼成時間は 15 分間とした。縮小投影型マスクレス露光装置を用いて、レジスト膜に紫外線をパターン露光した。図 4.5 に露光パターンを示す。露光パターンサイズは 1.86 mm×1.39 mm とし、口径 1.27 mm、螺旋位相プロファイルのトポロジカルチャージ 5、焦点距離 46.6 mm のスパイラルゾーンプレートを設計した。露光波長は 437 nm、露光強度は約 1.0 mW/cm²、露光時間は 5 秒とした。露光温度は室温 20℃とした。露光後、レジスト膜を温度 100℃で加熱し、光化学反応を抑制した。アルカリ系現像液 (東京応化工業、NMD-3) を用いて、レジスト膜に露光したパターンを現像した。現像温度は 20℃、現像時間は 2 分とした。レジスト膜を現像した基板を蒸留水で十分にリンスし、エアブローで基板表面に付着した水分を一気に除去した。リンスでは、200 ml の蒸留水に 3 分間軽く攪拌しながら浸漬させ、その後、流水で 3 回すすいだ。

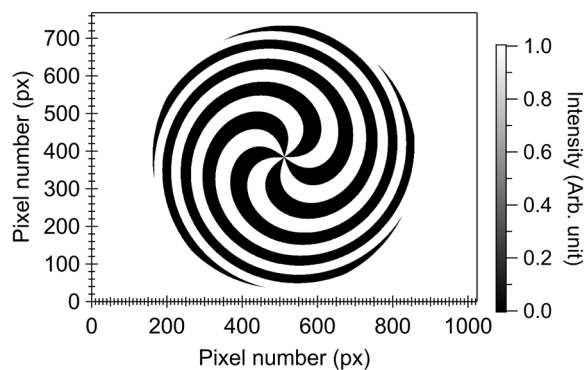


図 4.5 露光パターン

② パターン化したシラン単分子膜の形成

レジスト膜のパターンを現像した基板面にオクタデシルトリメトキシシラン（東京化成工業、Octadecyltrimethoxysilane）を気相蒸着した。気相蒸着は小型な金属製の真空チャンバー内で行い、チャンバーはホットプレートで加熱した。チャンバーの蓋に基板を設置し、チャンバー内に 2 ml のオクタデシルトリメトキシシラン溶液の入ったシャーレを配置した。チャンバーの加熱温度は 100℃とした。蒸着時間は 60 分とした。アミン系レジスト剥離液（東京応化工業、剥離液 106）にシラン膜を蒸着した基板を浸漬させ、レジスト膜のみ除去した。浸漬温度は 40℃、浸漬時間は 2 分とした。その後、イソプロパノール（ナカライテスク、2-Propanol）および蒸留水で基板をリンスした。アミン系レジスト剥離液は水と反応して強アルカリ性を示し、シラン単分子膜を劣化させるため、先にイソプロパノールを用いてリンスした。リンス後、エアブローを用いて基板を一気に乾燥させた。

③ 光配向膜塗布および配向処理

パターン化したシラン単分子膜が形成した基板面にアゾ系光配向剤（DIC, LIA-03）をスピコートした。スピコートは、回転速度 5000 rpm で 30 秒の 1 段階変速とした。スピコート時、空調等の風による塗布膜の乾燥を防ぐために基板を設置したスピコート台を囲った。スピコート後、基板をスピコート台上で 5 分程度放置し、塗布膜をゆっくりと乾燥させた。この時、塗布膜をゆっくりと乾燥させることで、シラン単分子膜上に塗布された光配向剤が露出した電極面側に濡れ広がって移動し、シラン単分子膜と光配向膜が同一基板表面上で領域分割される。紫外線照射装置（山下電装、HYPERCURE-200）およびフィルム型直線偏光子を用いて、基板に直線偏光の紫外線を照射し、光配向膜を一様に配向させた。照射波長は 365 nm、光強度は 70 mW/cm²、照射時間は 30 秒とした。以上により、垂直配向膜と水平配向膜が同一表面上に形成した親液撥液パターンニング基板を作製した。

④ セル作製および液晶封入

基板全面にシラン単分子膜が形成した対向基板を作製した。ITO 電極付きガラス基板（GEOMATEC, 1006）をアルカリ系洗浄液（フルウチ化学、セミコクリーン 56）および蒸留水を用いて、それぞれ 5 分および 10 分間超音波洗浄した。エアブローで基板表面に付着した水分を一気に除去した。基板の電極面にオクタデシルトリメトキシシラン（東京化成工業、Octadecyltrimethoxysilane）を気相蒸着した。チャンバーの蓋に基板を設置し、チャンバー内に 2 ml のオクタデシルトリメトキシシラン溶液の入ったシャーレを配置した。チャンバーの加熱温度は 100℃とした。蒸着時間は 60 分とした。

直径 5 μm の球状シリカスパーサー（日揮触媒化学、真絲球）を含んだ紫外線硬化性光学レジン（Norland, NOA68）を用いて、基板全面にシラン単分子膜が形成した対向基板と親液撥液パターンニング基板を貼り合わせた。シリカスパーサーと光学レジンの重量比は、1:100とした。紫外線硬化性光学レジンに紫外線を照射し、基板同士を固着させ、サンドイッチ型セルを作製した。セルにネマティック液晶 E7（LCC, E7）を封入した。封入温度は 80°Cとし、室温 25°Cまで 1.0°C/min の速度で冷却した。

偏光顕微鏡観察

図 4.6 に作製素子の偏光顕微鏡像と画像プロファイルを示す。図 4.6(a)および(b)は、パターン現像後のレジスト膜の光学顕微鏡像を示す。現像後のレジスト膜では、ストライプゾーン状の凹凸パターンが得られた。色の濃い部分は残存したレジスト膜、色の薄い部分は露出したガラス面に対応する。また、ピクセルに対応したエッジが確認され、約 $2\mu\text{m}$ のパターン分解能を達成した。

図 4.6(c)および(d)は、対角位における偏光顕微鏡像を示す。隣り合うゾーンで明暗が交互になったスパイラルゾーン状のパターンが得られた。図 4.6(e)および(f)は、消光位における偏光顕微鏡像を示す。対角位の像で明るい部分が暗くなり、基板全面で暗いテクスチャーが得られた。したがって、対角位および消光位で明暗が変化した部分では、液晶はハイブリッド配向を示し、その配向方位は一樣であることが分かった。

図 4.6(a)のパターン現像後のレジスト膜と図 4.6(c)と対角位における偏光顕微鏡像を比較すると、ガラス面が露出した部分で像が暗く、レジスト膜が残存した部分で像が明るくなっていることが確認された。これは、ガラス面が露出した部分にオクタデシルトリメトキシシラン膜、レジスト膜が残存していた部分に光配向膜が形成されたことに対応する。したがって、親液撥液パターンニングを用いることで、垂直配向とハイブリッド配向が隣り合うゾーンごとに明瞭に分割した液晶スパイラルゾーンプレートが実現できた。

また、対角位の偏光顕微鏡像において、隣り合うゾーンの境界付近で急激な干渉色の変化が見られた。これは、ゾーン境界において液晶の配向が急激に変化したためだと考えられる。また、ハイブリッド配向領域において、垂直配向領域間を橋渡しする複数の配向欠陥が確認された。この配向欠陥は、ハイブリッド配向領域における液晶の立ち上がりの向きによって生じる^[47]。これらの配向状態は、素子のリタデーションに影響し、回折効率の低下を引き起こす。作製素子において欠陥等で生じる配向遷移領域の大きさは約 $2\text{--}5\mu\text{m}$ 程度であることが分かった。したがって、安定した回折動作、すなわち十分に高い効率で集光光渦を得るためには、少なくとも $10\mu\text{m}$ 程度のゾーン幅が必要であることが分かった。

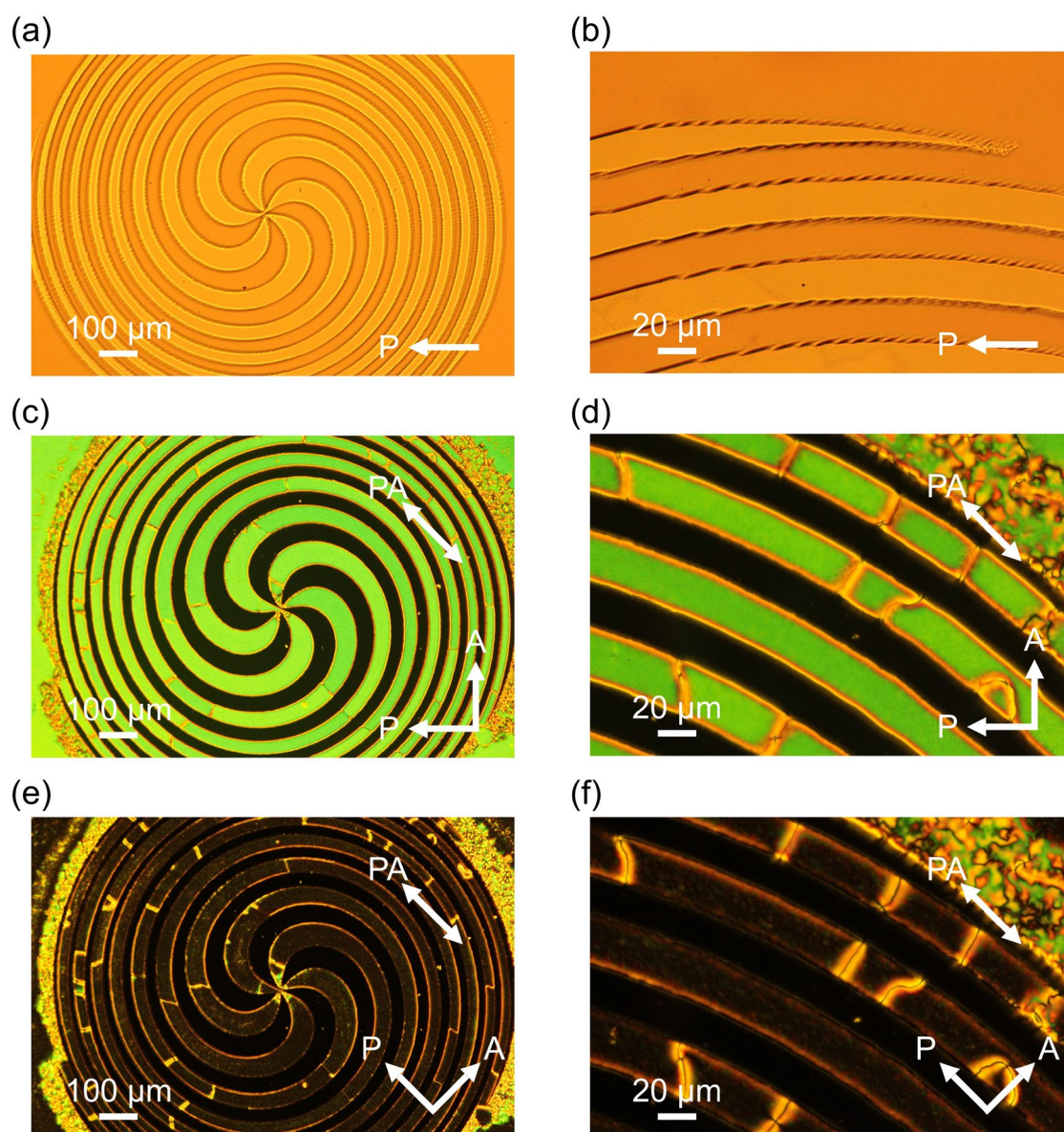


図 4.6 作製素子の偏光顕微鏡像：(a) 10 倍および(b) 50 倍で撮影したパターン現象したレジスト膜の光学顕微鏡像、(c) 10 倍および(d) 50 倍で撮影した対角位の偏光顕微鏡像、(e) 10 倍および(f) 50 倍で撮影した消光位の偏光顕微鏡像（P：偏光子の透過軸方向、A：検光子の透過軸方向、PA：光配向膜の配向方向）

素子の位相回折条件を明らかにするために、ハイブリッド配向領域における透過率スペクトルの電圧依存性を測定した。偏光顕微鏡で素子を観察し、マルチチャンネル分光器（浜松ホトニクス、C7473-36）を用いて透過率スペクトルを測定した。素子には、周波数 1.0 kHz の交流矩形波電圧を印加した。図 4.7 にハイブリッド配向領域における透過率の電圧依存性を示す。図 4.7(a)および(b)は、それぞれ透過率スペクトルの電圧依存性および各入射波長（480 nm、532 nm、632 nm）における透過率の電圧依存性を示す。液晶の配向状態がハイブリッド配向であるため、透過率スペクトルは電圧印加後直ちに变化し、明確な電圧閾値を持たなかった。入射波長 532 nm では、印加電圧 0.69 V で最小、1.45 V で最大の透過率が得られた。また、入射波長 480 nm および 632 nm では、印加電圧 1.67 V および 1.22 V で最大の透過率が得られた。

クロスニコル下における液晶の透過率は、半波長リタデーションの条件を満たすとき最大となる。したがって、上記の印加電圧条件のとき、各入射波長で最大の回折効率が得られることが分かった。

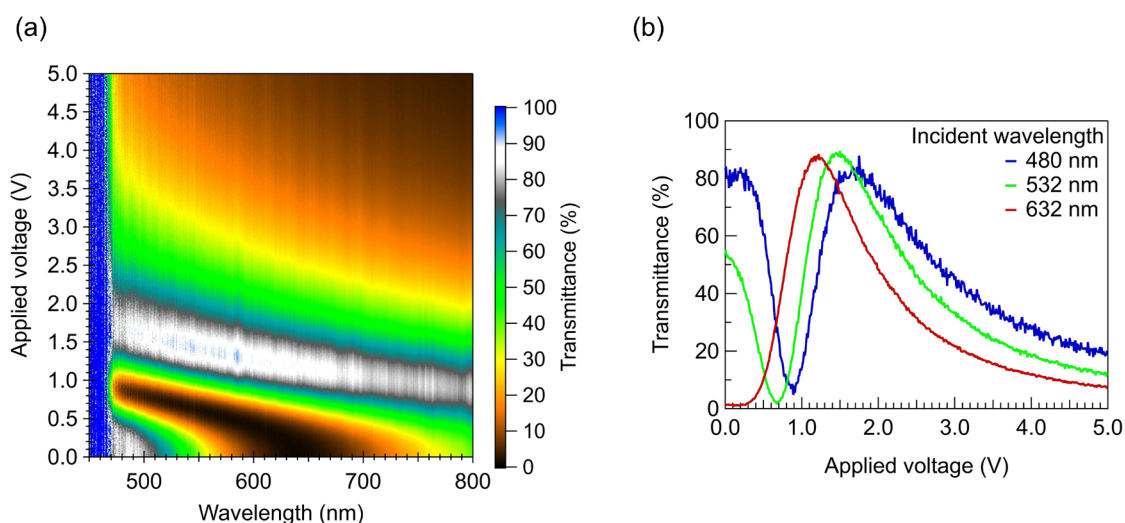


図 4.7 ハイブリッド配向領域における透過率の電圧依存性：(a)透過率スペクトルの電圧依存性、(b)入射波長における透過率の電圧依存性

4.3.2 動作実証

回折像観察

図 4.8 に回折像観察用の評価光学系を示す。評価光学系は、スーパーコンティニウムレーザー（NKT Photonics, SuperK COMPACT）、円形連続可変型金属 ND フィルター（Thorlabs, NDC-50C-2）、中心波長 532 nm のバンドパスフィルター、フィルム型直線偏光子、1/2 波長板、ファンクションジェネレーター（Agilent Technologies, Agilent 33500）、小型産業用カメラ（IDS Imaging, UI-3580CP-C-HQ Rev.2）を用いて構築した。

白色レーザーの光強度を ND フィルターで調整し、バンドパスフィルターを用いて中心波長 532 nm に変換した。波長帯域は $\Delta 10$ nm とした。ビーム径は約 1.0 mm であった。直線偏光子および 1/2 波長板を用いて入射直線偏光方位をハイブリッド配向方位に平行な方向になるよう調整した。ビームを素子に垂直入射し、透過光を CMOS イメージングセンサで撮影した。素子に周波数は 1.0 kHz の交流矩形波電圧を印加した。印加電圧は 0.69 V および 1.45 V とし、液晶のリタデーションが一波長条件および半波長条件の時の回折挙動を評価した。

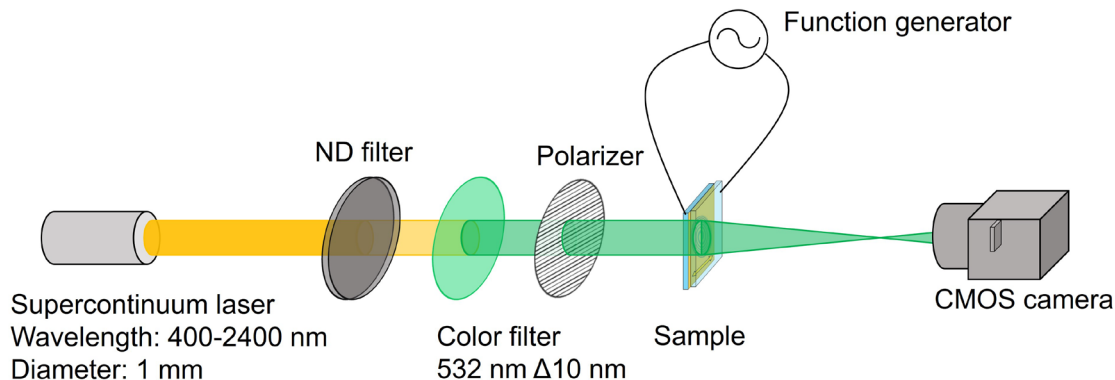


図 4.8 回折像観察用の評価光学系

集光光渦の観察

図 4.9 に焦点距離における回折像を示す。図 4.9(a)および(c)は、印加電圧 1.45 V のときの透過光像および光強度プロファイルを示す。光強度プロファイルの赤線および黒線は、それぞれ実験結果とシミュレーション結果を表す。ドーナツ状の光強度分布を有する透過光像が得られた。また、そのドーナツ穴の径は約 96.8 μm でシミュレーション結果と一致し、入射ビームの直径約 1.0 mm に対して十分に集光していることが分かった。したがって、作製素子を用いて集光光渦を生成できることが分かった。

図 4.9(b)および(d)は、印加電圧 0.69 V のときの透過光像および光強度プロファイルを示す。透過光は回折せずにそのまま透過した。これは、印加電圧 0.69 V のとき素子のリタデーションは一波長条件を満たし、光を回折しないためである（図 4.7 参照）。したがって、印加電圧によって、集光光渦の生成と消滅をスイッチできることが分かった。

図 4.9(b)において、らせん状の暗線が確認された。これは、液晶の配向欠陥やゾーン境界における液晶の配向変化に伴う急激なリタデーション変化が影響したのではないかと考えられる。また、パワーメーター（Ophir Optonics Solutions, Vega: 7Z01560）を用いて入射光および一次回折光、環境光の光強度を測定し、回折効率を算出した。得られた回折効率は 32.5 % で、理論値 41 % よりも 8.5 % 低かった。原因として、フレネル反射損失や配向欠陥等が影響したと考えられる。特に、入射光強度はレーザー光を直接受光素子に入射して測定しており、ガラス基板によるフレネル反射損失が主な原因であると考えられる。より高い効率を得るためには、反射防止膜付きの基板を使用するなどの対策が考えられる。

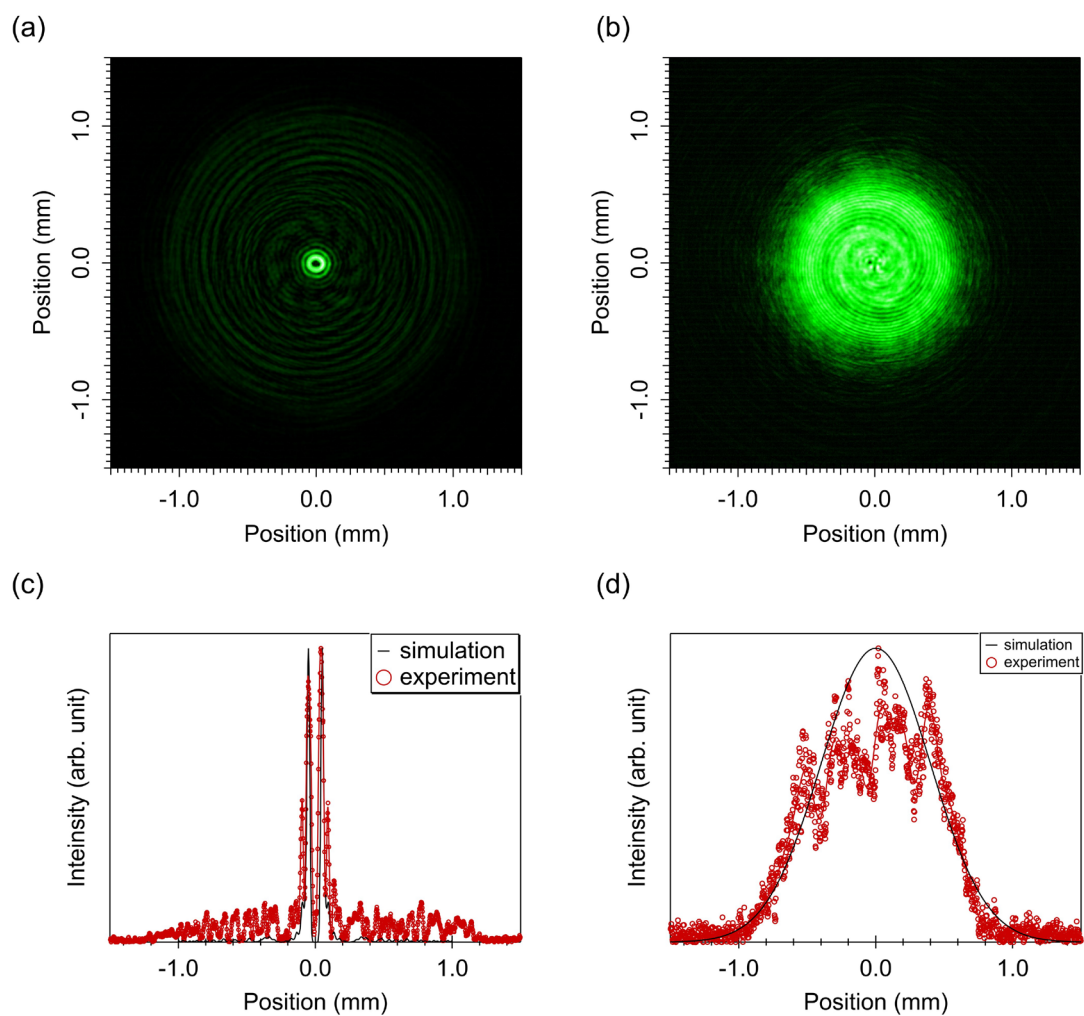


図 4.9 焦点距離における回折像：印加電圧が 0.69 V の時の(a) 透過光像および(c) 光強度プロファイル、印加電圧が 1.45 V の時の(b) 透過光像および(d) 光強度プロファイル

焦点距離前後の光強度プロファイル

図 4.10 に焦点距離前後の光強度分布を示す。図 4.10(a)および(b)は、それぞれレンズ光軸方向に沿った光強度分布および焦点距離前後の光強度プロファイルを示す。図中、黒いプロット点は焦点距離 $z = 46.6 \text{ mm}$ における光強度プロファイルを示し、青および赤のプロット点はそれぞれ焦点距離前後（前： $z = 37.3 \text{ mm}$ 、後： $z = 55.9 \text{ mm}$ ）の光強度プロファイルを示す。焦点距離前後の光強度プロファイルは焦点距離から $\pm 20\%$ の位置で測定した。ドーナツ穴の径は、焦点距離において最も小さくなった。ドーナツ穴の中心は、焦点距離および焦点距離前後で一致していた。したがって、生成された集光光渦の位相特異点とレンズ光軸は同軸光線上に存在することが分かった。

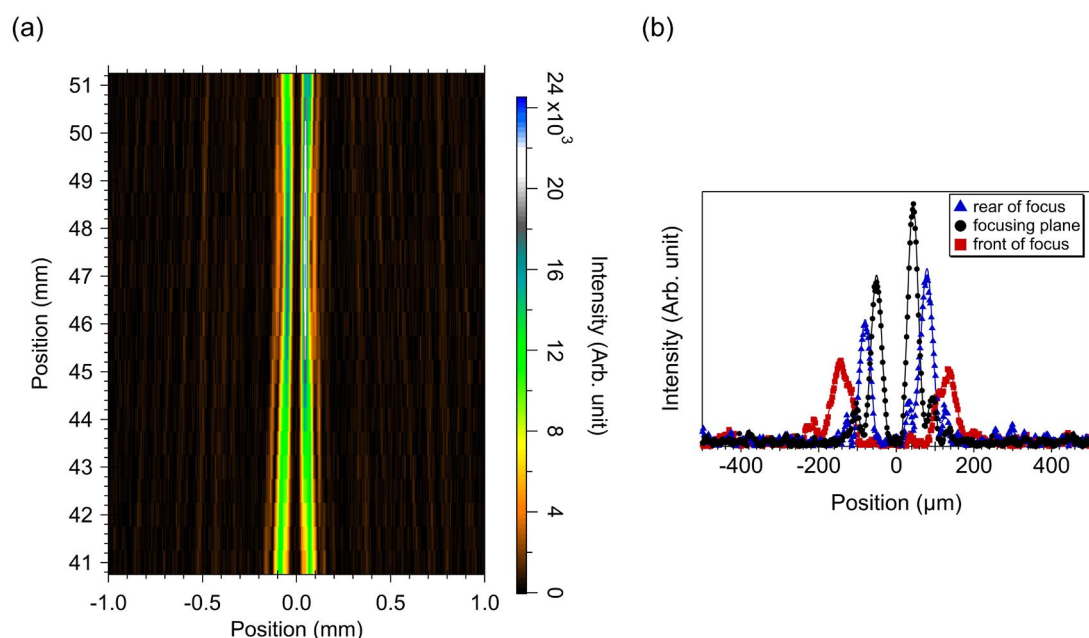


図 4.10 焦点距離付近の光強度分布：(a) レンズ光軸方向に沿った光強度分布、(b) 焦点距離前後の光強度プロファイル

焦点距離の波長依存性

波長 480 nm および 532 nm、632 nm の光を素子に入射し、回折像を観察することで各波長における焦点距離を測定した。測定には、図 4.8 に示した評価光学系を用いた。バンドパスフィルターを用いて入射波長を切り替えた。入射波長 480 nm および 532 nm、632 nm のとき、印加電圧はそれぞれ 1.69 V および 1.45 V、1.22 V とした。図 4.11 に焦点距離の波長依存性および各波長における回折像を示す。波長 480 nm および 532 nm、632 nm における焦点距離は、それぞれ 51.2 mm および 4.65 mm、37.4 mm であった。焦点距離は理論通り波長に対して反比例した。各波長において、ドーナツ状光強度分布を持った集光光渦が観察された。したがって、印加電圧を変化させることで、様々な波長で集光光渦が生成できることが分かった。

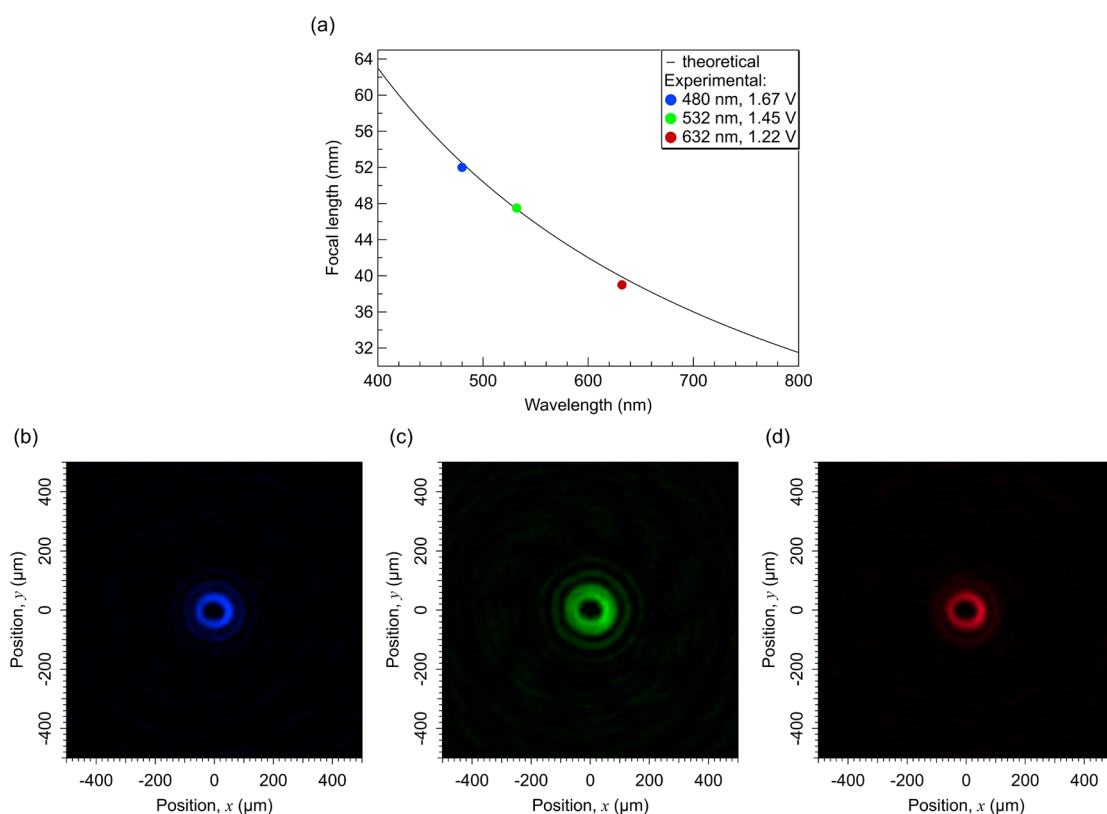


図 4.11 焦点距離の波長依存性：(a) 焦点距離の波長依存性、入射波長(b) 480 nm、(c) 532 nm、(d) 632 nm のときの集光スポットにおける回折像

4.4 結言

本研究では、液晶を用いた位相型スパイラルゾーンプレートを提案し、光学シミュレーション解析および実験により、高効率な集光光渦生成を実証した。本研究で得られた知見を以下に要約する。

1. 液晶を用いた位相型スパイラルゾーンプレートを提案し、その動作原理を示した。スパイラルゾーンプレートの透過関数から、位相特異点とレンズ光軸が同軸光線上にある集光光渦が生成されることを明らかにした。
2. フレネル回折理論に基づく光伝搬解析を用いて、位相型スパイラルゾーンプレートの回折挙動を評価した。波長 532 nm、直径 1.0 mm のガウシアンビームを口径 1.27 mm、螺旋位相プロファイルのトポロジカルチャージ 5 の位相型スパイラルゾーンプレートに入射すると、ドーナツ径約 100 μm の集光光渦が生成された。
3. 新液撥液パターンニング法を用いて液晶スパイラルゾーンプレートを作製した。垂直配向およびハイブリッド配向領域が明瞭に分割されたパターンが得られた。口径 1.27 mm、螺旋位相プロファイルのトポロジカルチャージ 5 の素子が作製できた。
4. 回折光を観察する評価光学系を構築し、作製素子の回折挙動を評価した。以下に、評価項目ごとの集光特性を示す。
 - (ア) 回折像観察において、焦点距離においてドーナツ状光強度分布が強く集光した回折像が得られた。提案素子による集光光渦の生成を実証した。
 - (イ) 電圧を印加し、液晶のリタデーションを制御することで集光光渦の生成・非生成状態をスイッチングできることを実証した。
 - (ウ) 回折像観察において、焦点距離前後においてもドーナツ状光強度分布が得られた。ドーナツ穴の中心位置はほぼ等しく、光渦の位相特異点とレンズ光軸が一致していることを実証した。
 - (エ) 焦点距離が波長に反比例することを実験的に確認した。
 - (オ) 回折条件を満たす波長で集光光渦が生成されることを実験的に確認した。

第5章 紫外線表面改質によるプレチルト角制御を用いた液晶偏向素子

5.1 緒言

光配向法を用いて液晶の分子配向場を空間的に制御した回折光学素子が近年注目を集めている[2, 13, 169, 170]。このデバイスはベリー位相素子 (Pancharatnam-Berry phase device) と呼ばれ、基板界面における液晶の配向方位角が空間的に分布した構造を有し、その配向パターンに応じて透過光の波面を変調できる^[19]。ベリー位相素子は、ロール・ツー・ロールなどの塗布製膜プロセスを用いたボトムアップ方式で製造可能なため、生産性に優れる^[171]。また、可視域全体で約 100% の回折効率が達成されている^[32-34, 172, 173]。これらの特長から、メタバース^[119, 120, 169, 174]、や宇宙産業分野^[175-177]で注目されている^[2]。しかしながら、動的な波面変調を実現するためには、複数のベリー位相素子と波長板を重ね合わせる必要があり^{[37][38]}、素子数に応じて光損失が増大するという課題があった^[178]。したがって、今後のデバイス開発では、動的な波面変調が可能な素子構造を実現するための新たな界面配向制御技術が求められる。

このような背景から近年、プレチルト角分布を有する液晶光学素子による動的な波面変調が報告された^[42, 45, 47, 179]。先行研究では、プレチルト角分布を有する液晶光学素子に電圧を印加し、バルク中の液晶を再配向させ、リタデーション分布を電氣的に制御することで動的な波面変調を実証した。液晶のプレチルト角の空間制御を実現するために基板界面で生じる配向フラストレートを利用している^[44]。しかしながら、数百 eV の高エネルギーな集光イオンビームを用いて配向膜を表面改質させる必要があるため、配向膜だけでなく下地の電極層まで破壊しているとの報告がある^[49]。したがって、デバイスの品質を向上させるための液晶配向制御技術が求められており、この課題を解決するひとつのアプローチとして、紫外線照射による配向膜の表面改質を用いたプレチルト角制御が挙げられる。

これまでに紫外線を用いたプレチルト角制御手法として、アゾベンゼン側鎖を有する配向膜^[180]や長鎖アルキルを有するシラン単分子膜^[181, 182]、ZnO 膜^[183, 184]、ポリイミド膜^[52, 142, 185, 186]を利用した例が報告されている。アゾベンゼン側鎖を有する配向膜では、トランス-アゾベンゼンの大きな双極子モーメントが、液晶分子との極性相互作用において重要な役割を果たし、この極性相互作用が垂直配向から水平配向への配向転移に影響を与えていると考えられている^[180]。長鎖アルキルを有するシラン単分子膜では、紫外線により発生したオゾンがアルキル鎖の C-C 結合を切断し、シラン単分子膜を徐々に分解し、最終的に末端基

にある C-Si、Si-O、O-C が光分解され、露出した基板面上にヒドロキシ基やカルボニル基が形成され、基板表面の濡れ性が向上し、プレチルト角が変化する^{[181][182]}。ZnO 膜では、紫外線照射によって ZnO 中に占める酸素空孔濃度が上昇する。酸素空孔には水分子が配位しやすい。したがって、ZnO 中の酸素空孔の濃度上昇によって水分子の濃度が上昇し、ZnO 表面の濡れ性が向上し、プレチルト角が変化する^{[183][184]}。紫外線照射による濡れ性の向上はポリイミド膜においても生じ、プレチルト角制御可能なことが報告されている^[52, 142, 185, 186]。しかしながら、液晶のプレチルト角が何によって決定するかは明らかとなっていない。一般に液晶のプレチルト角は、Friedel-Creagh-Kmetts (FCK) 則、すなわち液晶と配向膜の表面自由エネルギーに依存することが知られているが^[187-190]、矛盾する報告もある^[191]。この先行研究では、アルキル鎖の長さが異なる 2 種類のシランカップリング剤を混合した配向膜の接触角と液晶の配向状態を調査し、表面自由エネルギーが低い場合でも液晶が水平配向を示すことを明らかにし、アルキル鎖の分子コンフォメーションがプレチルト角の決定に重要な役割を果たしたと主張している^[191]。したがって、プレチルト角の決定には、分子間相互作用や表面自由エネルギー、分子コンフォメーションなどの様々なパラメーターが寄与しており、配向メカニズムの解明するためには、これらを統合した概念が必要となる。

そこで本研究では、マクロなパラメーターである表面自由エネルギーとミクロなパラメーターである分子間相互作用を統合するために、紫外線照射したポリイミド配向膜の表面自由エネルギーを 3 つの分子間相互作用（分散成分および双極子相互作用成分、水素結合成分）に成分分解して評価し、紫外線照射したポリイミド配向膜上の液晶の配向挙動を観察し、これらの関係性を調査した。さらに、紫外線表面改質によるプレチルト角制御を用いて液晶偏向素子を作製し、その偏向特性を評価した。

5.2 紫外線照射したポリイミド配向膜上の液晶配向挙動

基板界面における液晶の配向状態は、基板の表面自由エネルギーに依存することが知られている。そこで本研究では、紫外線照射した配向膜の接触角を測定し、表面自由エネルギーの紫外線照射量依存性を評価した。さらに、紫外線照射した配向膜上の液晶の配向挙動を観察し、プレチルト角の紫外線照射量依存性を評価した。

5.2.1 配向膜の表面自由エネルギー

吸光度スペクトルの紫外線照射量依存性

垂直配向ポリイミド膜に紫外線を照射し、紫外線照射前後の吸光度スペクトルを比較した。以下に、評価試料の作製方法と吸光度スペクトルの測定方法を示す。

① 測定試料の作製方法

合成石英基板をアルカリ系洗浄液（フルウチ化成、セミコクリーン 56）および蒸留水でそれぞれ5分および10分間超音波洗浄した。その後、UV オゾンクリーナー（Filgen、UV253）を用いて、基板表面をオゾン処理した。酸素の充填時間およびUV 照射時間、窒素充填時間はそれぞれ2分および10分、10分とした。

オゾン処理した基板にポリイミド配向剤（JSR、JALS-2096-R16）をスピンコートした。スピン条件は2段階変速とし、1段目は500 rpmで5秒、2段目は3000 rpmで30秒とした。その後、ポリイミド膜を温度80℃で2分間仮焼成し、膜に残留している溶媒を除去した。さらに、温度200℃で30分間本焼成し、熱イミド化反応させた。その後、データ比較のためにポリイミド膜をイソプロパノール（ナカライテスク、2-propanol）に2分間浸漬させたのち、蒸留水ですすいだ。リンス後、エアブローで一気に水分を飛ばし、基板を乾燥させた。

UV キュア用スポット光源（浜松ホトニクス、LC8 L9566-01A）を用いてポリイミド膜に紫外線を照射した。照射強度は500 mW/cm²、照射時間は2分30秒とした。図5.1に照射スペクトルを示す。照射スペクトルは、波長感度補正したマルチチャンネル分光器（浜松ホトニクス、）を用いて測定した。波長365 nm および300 nm 付近（312 nm、302 nm、296 nm）に複数の強い吸収ピークが確認された。紫外線照射は大気雰囲気下とし、基板温度は制御しなかった。紫外線照射後、ポリイミド膜をイソプロパノールに2分間浸漬させたのち、蒸留水ですすぎ、配向膜表面の光分解物を除去した。リンス後、エアブローで一気に水分を飛ばし、基板を乾燥させた。

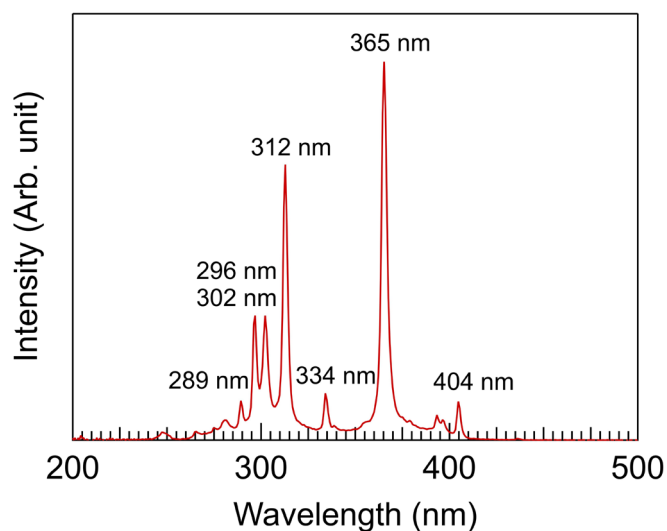


図 5.1 光源の照射スペクトル

② 吸光度スペクトルの測定

紫外可視近赤外分光光度計（島津製作所、UV-3150）を用いて、紫外線照射したポリイミド配向膜の吸光度スペクトルを測定した。測定波長は 190 nm から 600 nm までの範囲とし、波長分解能は 1.0 nm とした。測定は、本焼成後のポリイミド膜、本焼成後にリンスしたポリイミド膜、紫外線照射後のポリイミド膜、紫外線照射後にリンスしたポリイミド膜の 4 つの条件とし、それぞれ別々の試料を準備した。表 5.1 に試料番号と測定条件を示す。

表 5.1 測定試料の番号と測定条件

Sample No.	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
Sample condition	Polyimide film after main baking	Polyimide film rinsed after main baking	Polyimide film after UV irradiation	Polyimide film rinsed after UV irradiation

図 5.2 に吸光度スペクトルを示す。図中、赤の実線は本焼成後のポリイミド膜、赤の破線は本焼成にリンスしたポリイミド膜、青の実線は紫外線照射後のポリイミド膜、青の破線は紫外線照射後にリンスしたポリイミド膜の吸光度スペクトルを示す。本焼成後のポリイミド膜において、波長 200 nm および 265 nm に強い吸収ピークが確認された。本焼成後のポリイミド膜はリンス前後で若干、吸光度に差がみられたが、これは測定サンプルの膜厚の違いによって生じた誤差だと考えられる。実際に、上記の条件で作製したサンプルの膜厚は 48 ± 3 nm 程度の異なることを確認している。したがって、本焼成後のポリイミド膜の吸光度スペクトルはリンス前後で本質的に変化しないと考えられる。

紫外線照射後のポリイミド膜の吸光度スペクトル、特に吸収ピーク付近で大幅に減少し、リンスすることでさらに減少することが分かった。これは、紫外線照射によってポリイミド膜が光分解され、その生成された光分解物がリンス処理で除去されたためだと考えられる。したがって、ポリイミド膜の表面改質には、波長 265 nm 以下を含む紫外線を用いる必要があることが分かった。

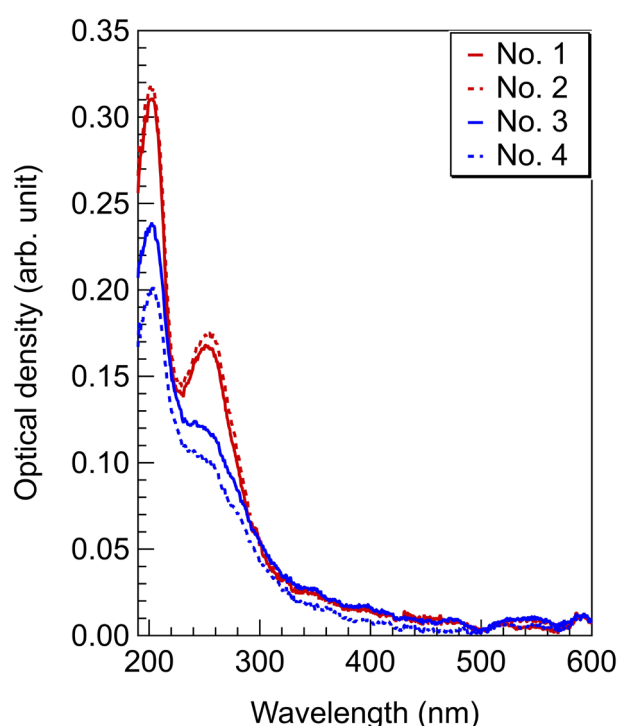


図 5.2 紫外線照射した垂直配向ポリイミド膜の吸光度スペクトル

接触角の紫外線照射量依存性

ポリイミド膜に紫外線を照射し、その紫外線照射量に対して配向膜の接触角がどのように変化するかを調査した。以下に、評価試料の作製方法と接触角の測定方法を示す。

① 測定試料の作製方法

ガラス基板（アズワン、2-9787-02）をアルカリ系洗浄液（フルウチ化成、セミコクリーン 56）および蒸留水でそれぞれ 5 分および 10 分間超音波洗浄した。

洗浄した基板にポリイミド配向剤をスピンコートした。スピン条件は 2 段階変速とし、1 段目は 500 rpm で 5 秒、2 段目は 3000 rpm で 30 秒とした。その後、ポリイミド膜を温度 80°C で 2 分間仮焼成し、膜に残留している溶媒を除去した。さらに、温度 200°C で 30 分間本焼成し、熱イミド化反応させた。

UV キュア用スポット光源（浜松ホトニクス、LC8 L9566-01A）を用いてポリイミド膜に紫外線を照射した。照射条件は、a. 照射強度を固定し、照射時間を変化させる場合、b. 照射時間を固定し、照射強度を変化させる場合の 2 種類とし、照射量（強度×時間）の依存性を評価した。具体的な照射条件は以下とした。

- a. 照射強度を 515 mW/cm² で固定とし、照射時間を 0 秒から 200 秒まで変化させた。
- b. 照射時間を 200 秒で固定とし、照射強度を 0.0 mW/cm² から 515 mW/cm² まで変化させた。

紫外線照射は大気雰囲気下とし、基板温度は制御しなかった。紫外線照射後、ポリイミド膜をイソプロパノールに 2 分間浸漬させたのち、蒸留水ですすぎ、配向膜表面の光分解物を除去した。リンス後、エアブローで一気に水分を飛ばし、基板を乾燥させた。

② 接触角の測定

水平に置かれた基板に液体を滴下し、濡れの様子をカメラで撮影した。撮影した画像をデータ解析し、 $\theta/2$ 法を用いて接触角を算出した。

マイクロピペット（Eppendorf、Eppendorf Research plus）を用いて、紫外線照射した垂直配向ポリイミド膜上に液体を 2 μ L 滴下した。使用した液体は、蒸留水、およびエチレングリコール（ナカライテスク、Ethylene Glycol : EG）、ジヨードメタン（ナカライテスク、Diiodomethane : MI）の 3 種類とした。撮影には、スマートフォン（Apple、iPhone 13 mini）とマクロレンズ（Selvim、Macro25 X）を用いた。撮影回数は 5 回とした。

図 5.3 に得られた接触角を示す。図 5.3(a)および(b)は、それぞれ接触角の紫外線照射時間依存性および紫外線照射強度依存性を示す。青および赤、緑のプロット線は、それぞれ蒸留水およびエチレングリコール、ジヨードメタンの接触角を示す。エラーバーは得られた接触角の最大値および最小値、プロット点は相加平均値を表す。3 種類すべての液体において、接触角は紫外線照射時間および強度に対して単調に減少した。

図 5.3(c)は、接触角の紫外線照射量依存性を示す。●印および×印は、それぞれ照射時間および照射強度依存性を意味する。照射時間依存性と照射強度依存性は、ほぼ同じ結果を示した。したがって、紫外線照射した垂直配向ポリイミド膜の接触角は紫外線照射量に依存して変化することが分かった。

蒸留水とエチレングリコールの接触角の紫外線照射量依存性は、ジヨードメタンよりも大きな変化を示した。蒸留水とエチレングリコールの分子間相互作用は、ジヨードメタンに比べて比較的大きな極性成分を有している。紫外線照射によって光分解した表面分子には、ヒドロキシ基やカルボキシ基などの水素結合成分が高い官能基を結合していると考えられる。したがって、蒸留水やエチレングリコールの接触角はジヨードメタンよりも大きく変化したと考えられる。

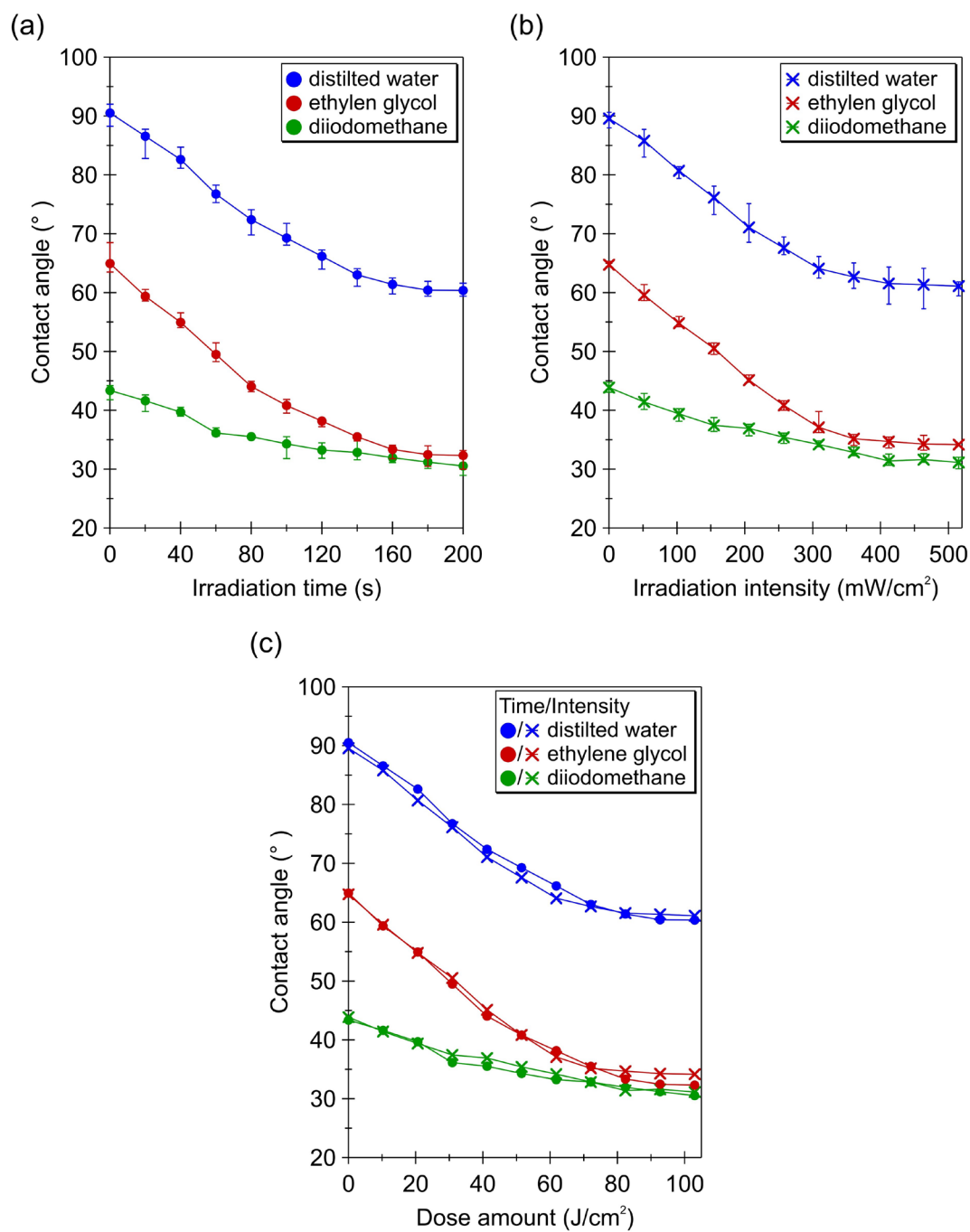


図 5.3 接触角の紫外線照射量依存性：(a) 照射時間依存性、(b) 照射強度依存性、(c) 照射量依存性

表面自由エネルギーの紫外線照射量依存性

紫外線照射した垂直配向ポリイミド膜の表面自由エネルギーを評価した。配向膜の分子間相互作用を明らかにするために、北崎・畑法を用いて表面自由エネルギーを算出した^[192]。表 5.2 に、接触角測定に用いた 3 種類の液体の表面自由エネルギーを示す。

図 5.4 に得られた表面自由エネルギーを示す。図 5.4(a)および(b)は、それぞれ表面自由エネルギーの紫外線照射時間依存性および紫外線照射強度依存性を示す。黒のプロット線は、配向膜の表面自由エネルギーを表す。赤および緑、青のプロット線は、表面自由エネルギーのうち分散成分および双極子相互作用成分、水素結合成分を表す。図 5.4(c)は、表面自由エネルギーの紫外線照射量依存性を示す。●印および×印は、それぞれ照射時間および照射強度依存性を表す。照射時間依存性と照射強度依存性は、ほぼ同じ結果を示した。したがって、紫外線照射したポリイミド膜の表面自由エネルギーは紫外線照射量に依存して変化することが分かった。

配向膜の表面自由エネルギーは紫外線照射量に対して緩やかに単調増加した。表面自由エネルギーのうち分散成分は紫外線照射量に依らず一定であった。一方で、双極子相互作用成分および水素結合成分、すなわち極性成分は紫外線照射量の増加に対して増加した。したがって、表面自由エネルギーの紫外線照射量依存性は、分子間相互作用成分ごとに異なることが分かった。

表 5.2 各種液体の表面自由エネルギー

Surface free energy	Total	Dispersion term	Dipole interaction term	Hydrogen bond term
Distilled water	72.8	29.1	1.3	42.4
Ethylene glycol	47.7	30.1	0.0	17.6
Diiodomethane	50.8	46.8	4.0	0.0

(unit: mJ/m²)

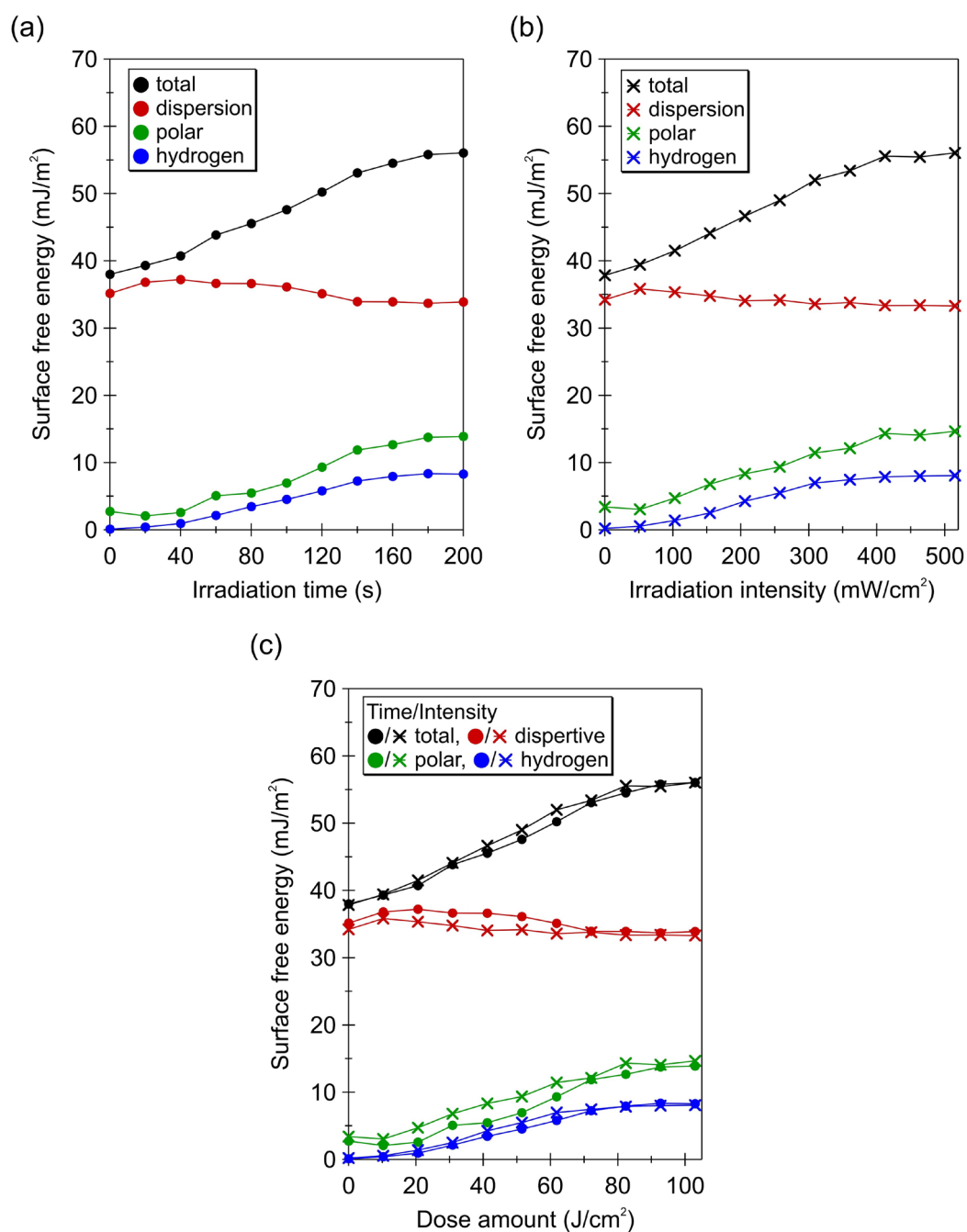


図 5.4 紫外線照射した垂直配向ポリイミド膜の表面自由エネルギー：(a) 照射時間依存性、(b) 照射強度依存性、(c) 照射量依存性

5.2.2 液晶の配向挙動

5.2.1 項において、垂直配向ポリイミド膜の表面自由エネルギーは紫外線照射量の増加に対して緩やかに単調増加することが分かった。本項では、紫外線照射した垂直配向ポリイミド膜上で液晶がどのように配向するか調査した。

素子作製

紫外線照射した垂直配向ポリイミド膜を一様にラビングし、基板同士を貼り合わせて液晶セルを作製した。以下に、評価試料の作製方法を示す。

・評価試料の作製方法

ガラス基板（アズワン、2-9787-02）をアルカリ系洗浄液（フルウチ化成、セミコクリーン 56）および蒸留水でそれぞれ 5 分および 10 分間超音波洗浄した。

洗浄した基板にポリイミド配向剤をスピンコートした。スピン条件は 2 段階変速とし、1 段目は 500 rpm で 5 秒、2 段目は 3000 rpm で 30 秒とした。その後、ポリイミド膜を温度 80℃で 2 分間仮焼成し、膜に残留している溶媒を除去した。さらに、温度 200℃で 30 分間本焼成し、熱イミド化反応させた。

UV キュア用スポット光源（浜松ホトニクス、LC8 L9566-01A）を用いてポリイミド膜に紫外線を照射した。照射条件は、a. 照射強度を固定し、照射時間を変化させる場合、b. 照射時間を固定し、照射強度を変化させる場合の 2 種類とし、照射量（強度×時間）の依存性を評価した。具体的な照射条件は以下とした。

- a. 照射強度を 515 mW/cm² で固定とし、照射時間を 0 秒から 300 秒まで変化させた。
- b. 照射時間を 200 秒で固定とし、照射強度を 0.0 mW/cm² から 772.5 mW/cm² まで変化させた。

紫外線照射は大気雰囲気下とし、基板温度は制御しなかった。紫外線照射後、ポリイミド膜をイソプロパノールに 2 分間浸漬させたのち、蒸留水ですすぎ、配向膜表面の光分解物を除去した。リンス後、エアブローで一気に水分を飛ばし、基板を乾燥させた。

ラビング装置（EHC、RM-50）を用いて、配向膜を一様に擦った。ラビングロールにはレーヨン製の布を使用した。ラビングロールおよび往復ステージの一次側モーターの回転数は、それぞれ 1250 rpm および 1700 rpm とし、ステージの往復回数 5 回とした。往復ステージの高さは 3.68 mm とした。

ラビングした基板を直径 15μm の球状シリカスパーサー（日揮触媒化学、真絲球）を混ぜた紫外線硬化性樹脂（Norland、NOA68）で貼り合わせてサンドイッチ型セルを作製した。このとき、紫外線照射量が同じ基板同士を貼り合わせた。紫外線照射装置（山下電装、

HYPERCURE-200) を用いて波長 365 nm、光強度 128 mW/cm² の紫外線をセルに照射し、基板同士を固着させた。セルにネマティック液晶 5CB (Merck、K-15) を封入した。入封温度は 50°C とし、室温 25°C になるまで自然冷却した。

偏光顕微鏡観察

図 5.5 に照射時間を変えて作製した評価試料の偏光顕微鏡像を示す。メインの図はオルソスコープ像、右上図はコノスコープ像を示す。オルソスコープ観察では、倍率 10 倍、NA 0.3 の対物レンズ (Nikon、CF Plan 10X) を使用した。またコノスコープ観察では、倍率 50 倍、NA 0.45 の対物レンズ (Nikon、CF Plan 50X) を使用した。

紫外線を照射していない試料において、オルソスコープ像は全体が暗いテクスチャーとなった。また、試料ステージを回転させても常に暗いてテクスチャーが観察された。さらに、コノスコープ像では十文字状の暗線 (isogyre) が観察された。したがって、紫外線照射していないポリイミド膜上で液晶は、明らかな垂直配向を示すことが分かった。

紫外線照射した試料において、オルソスコープ像は紫外線時間量の増加に伴い徐々に明るくなり、色調も変化した。コノスコープ像では、紫外線時間量の増加に伴って十文字状の暗線がラビング方向へ徐々にシフトし、最終的に縞のない様なテクスチャーが得られた。したがって、ポリイミド膜に紫外線を照射すると、その照射時間に応じて液晶の配向状態が徐々にチルトし、完全に水平配向になることが分かった。

図 5.6 に照射強度を変えて作製した評価試料の偏光顕微鏡像を示す。図中の像は図 5.5 と同じ条件で観察した。図 5.5 に示す照射時間を変えて作製した評価試料の偏光顕微鏡像と同様の傾向が確認され、照射時間および照射強度、すなわち照射量に応じて液晶のチルト配向が徐々に変化することが分かった。

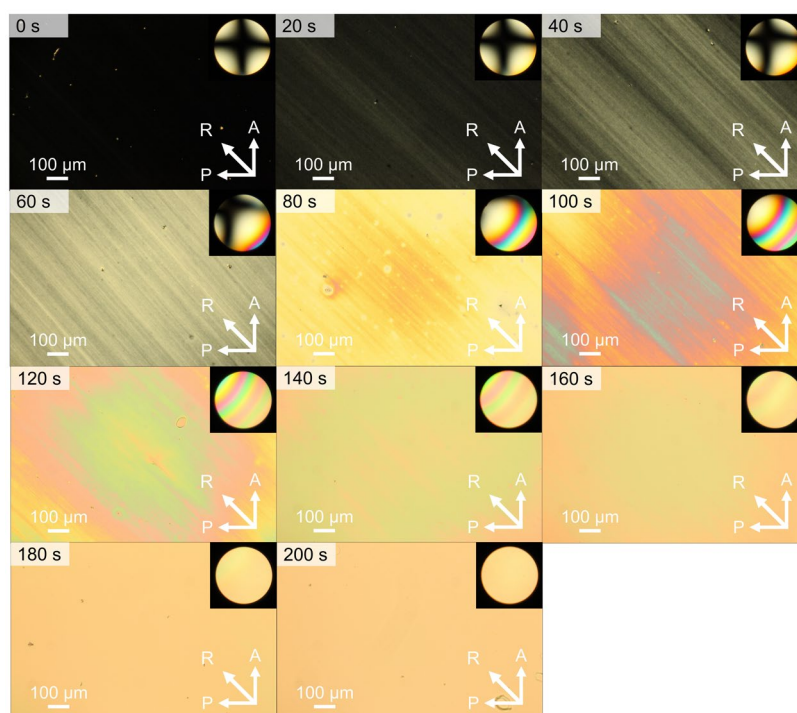


図 5.5 照射時間を変えて作製した評価試料の偏光顕微鏡像（P：偏光子の透過軸方位、A：検光子の透過軸方位、R：ラビング方位）

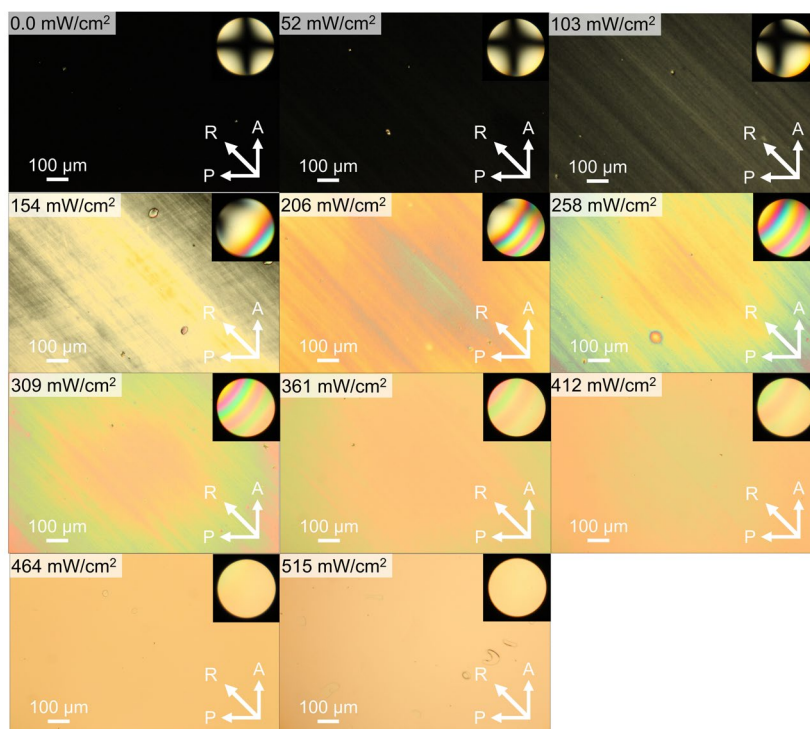


図 5.6 照射強度を変えて作製した評価素子の偏光顕微鏡像（P：偏光子の透過軸方位、A：検光子の透過軸方位、R：ラビング方位）

プレチルト角の算出

評価試料の透過率スペクトルを測定し、実効的な複屈折率を算出した。さらに、屈折率楕円体で与えられる関係式からプレチルト角を算出した。以下に、プレチルト角の算出方法を示す。

クロスニコル下の液晶の透過率 $T(\theta, \Gamma)$ は次式で与えられる。

$$T(\theta, \Gamma) = T_0 \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Gamma}{2}\right)$$

ここで、 θ は液晶の方位角、 T_0 は最大の透過率、 Δn は複屈折率、 d は液晶層の厚さ、 λ は入射波長、 $\Gamma = 2\pi\Delta nd/\lambda$ は液晶のリタデーションを表す。Cauchy の分散式によれば、複屈折率 $\Delta n(\lambda)$ は次式で示される^[193]。

$$\Delta n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}$$

ここで、A、B、Cは定数である。実験で得られた透過率スペクトルを理論式でフィッティングし、定数A、B、Cを求めることで一様配向した液晶セルにおける実効的な複屈折率を算出した。図 5.7 にフィッティングの結果を示す。図 5.7(a)および(b)は、それぞれ透過率スペクトルのフィッティング結果および算出された複屈折率の波長分散を示す。図は、作製条件を照射強度 515 mW/cm²、照射時間 200 秒とした試料の測定結果を表す。同様にほかの作製条件においても、透過率をフィッティングし、実効的な複屈折率を算出した。

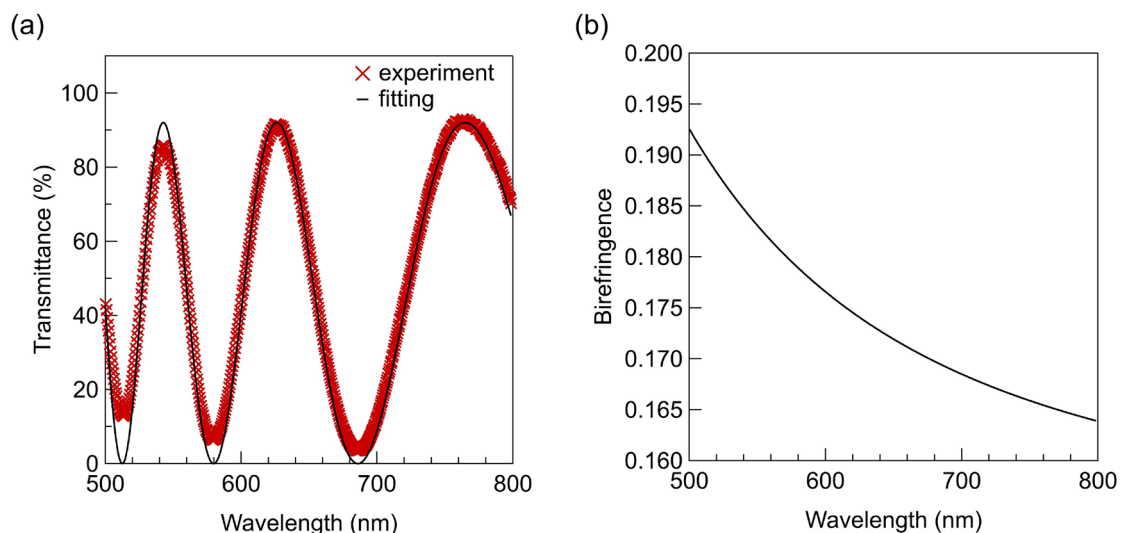


図 5.7 透過率フィッティング：(a) 透過率スペクトル、(b) 複屈折率の波長分散

一様配向した液晶セルにおける実効的な異常光屈折率 n'_{eff} は、次式で与えられる。

$$n'_{\text{eff}} = \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_e^2 \sin^2(\varphi) + n_o^2 \cos^2(\varphi)}}$$

ここで、 n_e および n_o は液晶材料の異常光屈折率および常光屈折率を表し、 φ は液晶のチルト角を表す。実効的な異常光屈折率 n'_{eff} は、算出した実効的な複屈折率 Δn を用いて次式で表すことができる。

$$n'_{\text{eff}} = \Delta n + n_o$$

これらの関係式から液晶のチルト角 φ は、次式として計算できる。

$$\varphi = \sin^{-1} \left[\sqrt{\frac{1}{n_e^2 - n_o^2} \left\{ \left(\frac{n_e n_o}{\Delta n + n_o} \right)^2 + n_o^2 \right\}} \right]$$

液晶材料 5CB の常光屈折率と異常光屈折率を次式から計算した^[194]。

$$\begin{aligned} n_o &= 1.5139 + 0.0052\lambda^2 + 0.0008\lambda^4, \\ n_e &= 1.6708 + 0.0081\lambda^2 + 0.0024\lambda^4 \end{aligned}$$

表 5.3 に作製試料のセルギャップを示す。

表 5.3 作製試料のセルギャップ

Irradiation time (s)	Cell gap (μm)	Irradiation Intensity (mW/cm^2)	Cell gap (μm)
0	15.4	0.0	15.0
20	15.9	51.5	14.8
40	15.2	103.0	15.0
60	16.1	154.5	15.6
80	17.3	206.0	15.2
100	18.2	257.5	15.1
120	15.2	309.0	15.2
140	18.0	360.5	15.0
160	14.2	412.0	14.0
180	14.5	463.5	14.0
200	15.7	515.0	15.7
300	16.2	772.5	14.8

図 5.8 にプレチルト角の紫外線照射依存性を示す。図 5.8(a)および(b)、(c)は、それぞれプレチルト角の紫外線照射時間依存性および照射強度依存性、照射量依存性を示す。●印および×印は、それぞれ照射時間および照射強度依存性を示す。照射時間依存性と照射強度依存性は、ほぼ同じ結果を示した。プレチルト角は紫外線照射量の増加に対して減少した。変化量は約 90 度から約 0 度まで連続的で、45 度付近の中間状態も得られた。依存性は線形カーブでなく、S 字カーブを示した。また、照射量約 100 mJ/cm^2 において飽和した。従って、垂直配向ポリイミド膜への紫外線照射量に応じて液晶のプレチルト角が任意に制御可能であることが明らかとなった。

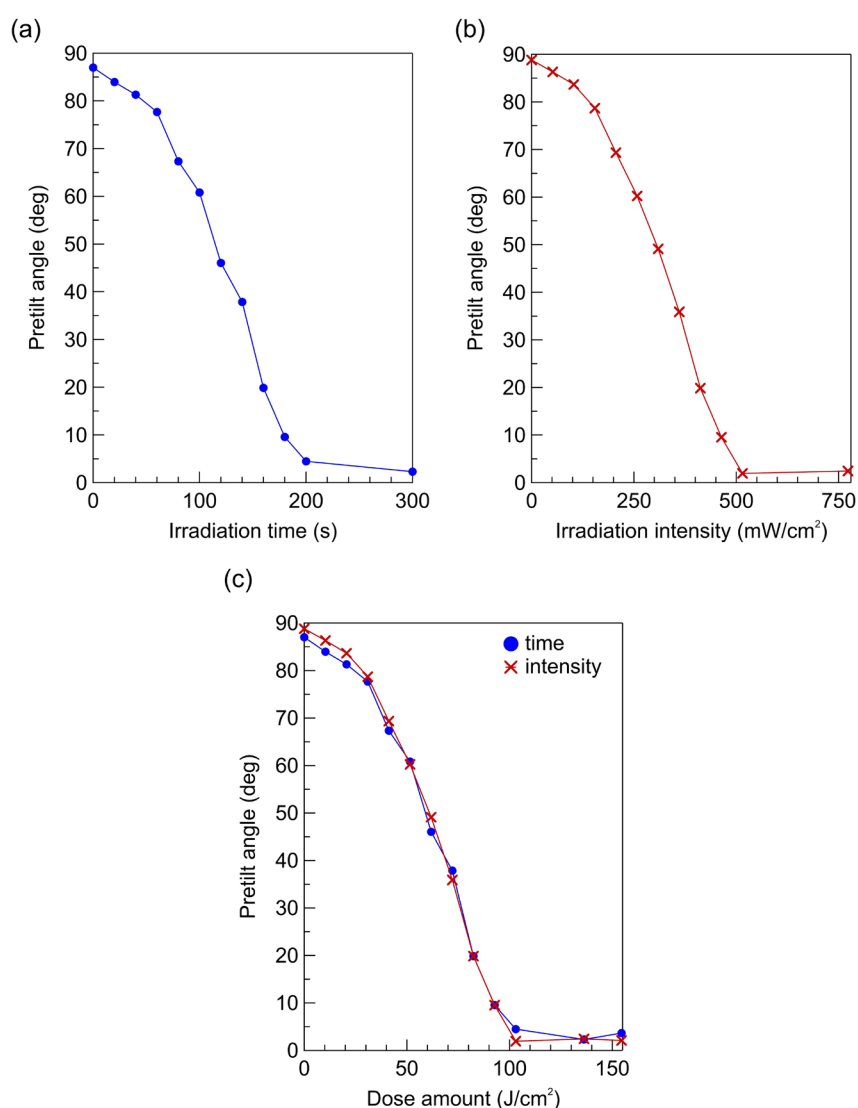


図 5.8 プレチルト角の紫外線照射依存性：(a) 照射時間依存性、(b) 照射強度依存性、(c) 照射量依存性

5.3 デバイス作製および動作実証

5.2 節において、垂直配向ポリイミド膜への紫外線照射量に依って液晶のプレチルト角が連続的に制御できることが明らかとなった。本節では、紫外線照射量を空間的に制御することで、任意なプレチルト角分布の形成が可能であるか調査した。さらに、一次元方向に周期的なプレチルト角分布を有する液晶偏向素子を作製し、偏向特性を評価した。

5.3.1 素子作製

素子作製

フォトマスクを用いた紫外線照射装置により紫外線の照射時間を空間的に制御し、プレチルト角分布を有する液晶素子を作製した。以下に、評価試料の作製方法を示す。

ガラス基板（GEOMATEC、1006）をアルカリ系洗浄液（フルウチ化成、セミコクリーン 56）および蒸留水でそれぞれ 5 分および 10 分間超音波洗浄した。

洗浄した基板にポリイミド配向剤をスピンコートした。スピン条件は 2 段階変速とし、1 段目は 500 rpm で 5 秒、2 段目は 3000 rpm で 30 秒とした。その後、ポリイミド膜を温度 80°C で 2 分間仮焼成し、膜に残留している溶媒を除去した。さらに、温度 200°C で 30 分間本焼成し、熱イミド化反応させた。

紫外線露光装置を用いてポリイミド膜に紫外線を照射した。図 5.9 に紫外線露光装置を示す。図 5.9(a)は照射装置の光学系を示す。UV キュア用スポット光源（浜松ホトニクス、LC8L9566-01A）から照射された光を平凸レンズでコリメートした。平行光は、フォトマスクを通して垂直配向ポリイミド膜に露光した。フォトマスクはクロムが蒸着した合成石英基板を使用し、マスクのスリット幅は 2 mm とした。X 軸ステージを動かし、露光時間を制御した。照射時間は 300 秒とし、移動距離は 1.0 mm とし、移動距離ステップは 1 μm とした。移動速度は、(a) 一定速度 (3.3 $\mu\text{m/s}$) および (b) 線形なプレチルト角分布が得られるように補正した速度の二条件とした。図 5.9(b)に移動速度の補正方法を示す。プレチルト角は照射時間に対して線形ではなく、S 字状カーブで変化するため、特定のプレチルト角 ϕ_i を得るためには特定の照射時間 t_i が必要となる。実験では、プレチルト角を 1000 ステップに分割し、各プレチルト角ステップに対応する照射時間を算出し、ステージを移動させた。紫外線照射は大気雰囲気下とし、基板温度は制御しなかった。紫外線照射後、ポリイミド膜をイソプロパノールに 2 分間浸漬させたのち、蒸留水ですすぎ、配向膜表面の光分解物を除去した。リンス後、エアブローで一気に水分を飛ばし、基板を乾燥させた。

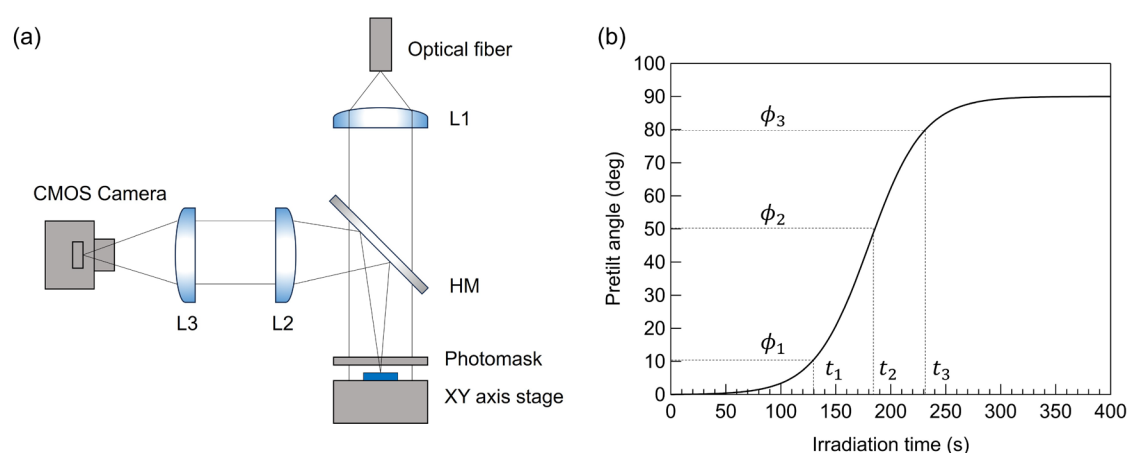


図 5.9 紫外線露光装置：(a) 照射装置の光学系、(b) ステージ速度の制御方法

ラビング装置（EHC、RM-50）を用いて、配向膜を一様に擦った。ラビングロールにはレーヨン製の布を使用した。ラビングロールおよび往復ステージの一次側モーターの回転数は、それぞれ 1250 rpm および 1700 rpm とし、ステージの往復回数 5 回とした。往復ステージの高さは 3.68 mm とした。

ラビングした基板を直径 15 μm の球状シリカスパーサー（日揮触媒化学、真絲球）を混ぜた紫外線硬化性樹脂（Norland、NOA68）で貼り合わせてサンドイッチ型セルを作製した。このとき、紫外線照射量が同じ基板同士を貼り合わせた。紫外線照射装置（山下電装、HYPERCURE-200）を用いて波長 365 nm、光強度 128 mW/cm² の紫外線をセルに照射し、基板同士を固着させた。セルにネマティック液晶 5CB（Merck、K-15）を封入した。入封温度は 50°C とし、室温 25°C になるまで自然冷却した。

偏光顕微鏡観察

図 5.10 に作製素子の偏光顕微鏡像を示す。図 5.10(a)は一定の速度で自動ステージを移動させて配向膜に紫外線を照射して作製した素子を示し、図 5.10(b)は自動ステージの移動速度を補正して作製した素子を示す。どちらの素子においても、右から左にかけて黒色から虹色に色調が変化したテクスチャーが得られた。このことから、紫外線照射時間に応じた連続的なプレチルト角分布が実現できた。

図 5.11 は作製素子のリタデーション分布を示す。2次元複屈折評価装置(Photonic Lattice、WPA series)を用いてリタデーション分布を測定した。図 5.11(a)は一定の速度で自動ステージを移動させて配向膜に紫外線を照射して作製した素子を示し、図 5.11(b)は自動ステージの移動速度を補正して作製した素子を示す。ステージの移動速度を一定とした場合、プレチルト角の紫外線照射時間依存性と同様の S 字状カーブのリタデーション分布が得られた。一方でステージの移動速度を補正とした場合、線形なリタデーション分布が得られた。また、露光距離 1.0 mm に対応した周期 1 mm のプレチルト角分布が得られた。

図 5.11(b)のリタデーション分布には、局所的なばらつきがみられた。これは、配向膜のラビング方向に沿って生じる縞状のテクスチャーによるもので、プレチルト角の配向周期が長いほど顕著に表れることを実験的に確認している。縞状テクスチャーは紫外線照射量分布のムラやラビング強度などに影響すると考えられ、均質なテクスチャーを得るためにはこれらの条件を最適化する必要がある。

図 5.12 は露光時間を補正した素子のリタデーション分布の電圧依存性を示す。電圧印加に伴いリタデーション分布は減少した。リタデーション分布は線形性を維持したまま減少することが分かった。また、交流矩形波電圧 20 Vpp の十分な電圧を印加してもリタデーション分布は全面で 0 にならなかった。これは界面付近において液晶の配向状態が固定され、特定のプレチルト角を維持しているためだと考えられる。

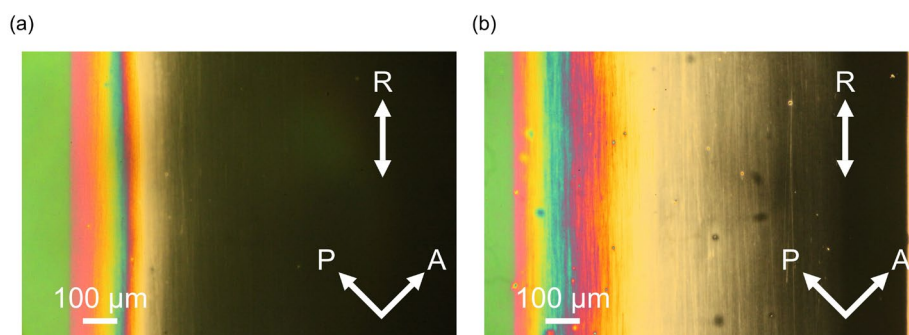


図 5.10 作製素子の偏光顕微鏡像：(a) 補正なし、(b) 補正あり

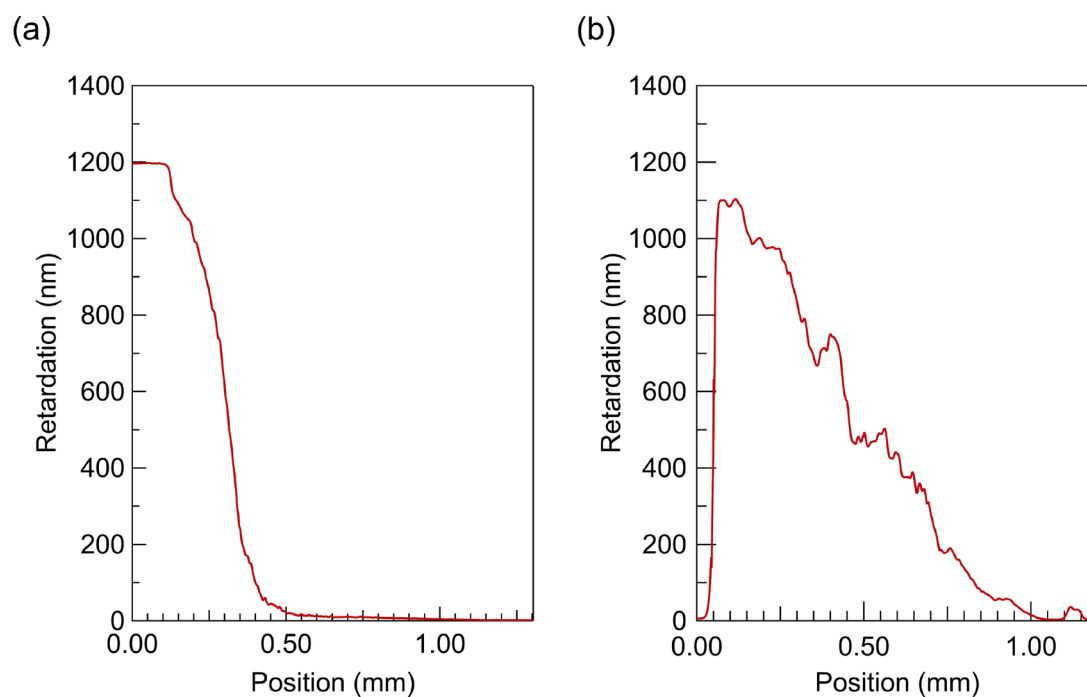


図 5.11 作製素子のリタデーション分布：(a) 補正なし、(b) 補正あり

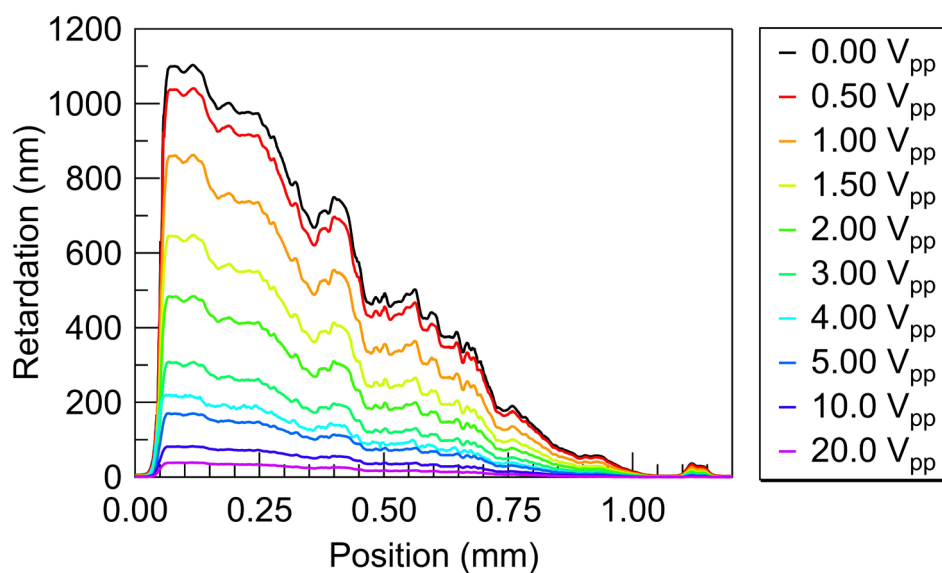


図 5.12 リタデーション分布の電圧依存性

5.3.2 動作実証

透過光観察

作製素子に波長 550 nm のレーザービームを入射し、透過した光を CMOS イメージングカメラセンサ (IDS、UI-3580CP-C-HQ_Rev_2) で観察し、ビームの偏向特性を評価した。作製素子とカメラの距離は 1 m とした。YIQ 変換を用いて RGB 画像データを輝度データ (Y) に変換し、グレースケールの強度プロファイルを得た。

入射偏光依存性

図 5.13 に透過光の入射偏光依存性を示す。図 5.13(a)および(c)は、入射偏光方位をラビング方位に対して垂直としたときの透過光像および強度プロファイルを示す。図 5.13(b)および(d)は、入射偏光方位をラビング方位に対して平行としたときの透過光像および強度プロファイルを示す。入射偏光方位をラビング方位に対して垂直とした場合、レーザービームはそのまま直進した。入射偏光方位をラビング方位に対して平行とした場合、レーザービームは右側へ偏向した。

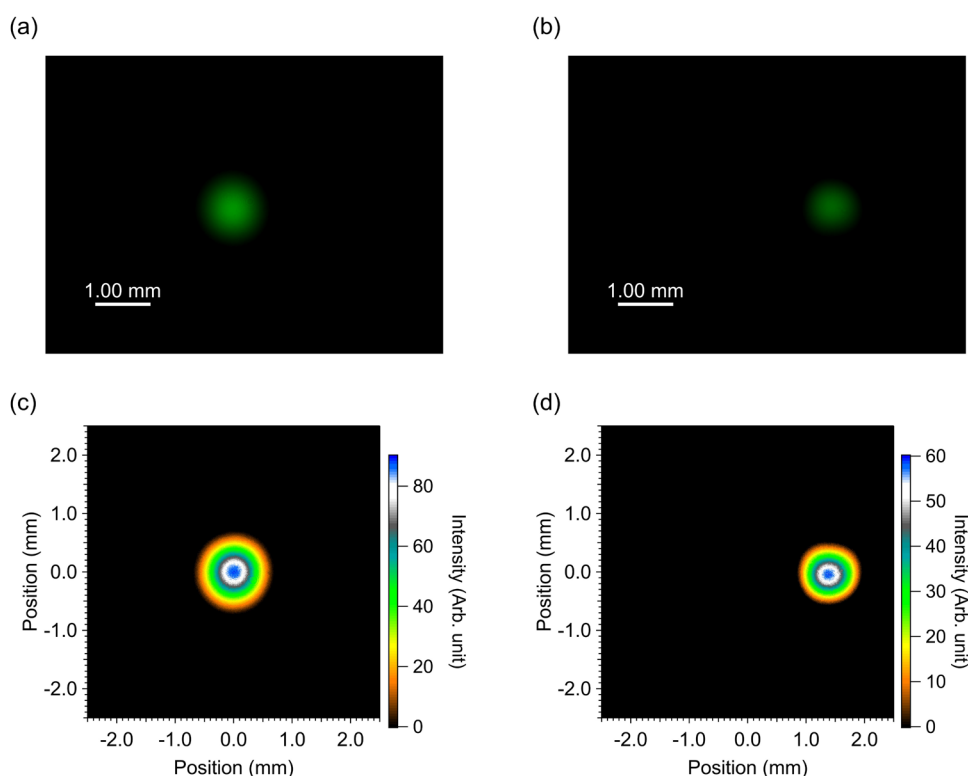


図 5.13 透過光の入射偏光依存性：入射直線偏光方位とラビング方位が垂直の時の (a) 透過光像および(c) 強度プロファイル、入射偏光方位とラビング方位が平行のときの(b) 透過光像および(d) 強度プロファイル

印加電圧依存性

図 5.14 に電圧印加時の透過光の偏向特性を示す。図 5.14(a)は入射光像、印加電圧 0 V および 1 V、10 V の時の透過光像を示す。図 5.14(b)は偏向角の印加電圧依存性を示す。透過光は印加電圧 0 V のとき最も偏向され、その偏向角は約 0.08 度であった。偏向角は印加電圧の増加に伴い偏向角が徐々に減少し、印加電圧 10 V では、偏向角はほぼ 0 度となった。したがって、作製素子は透過光の偏向角度を電氣的に変調可能であることが分かった。

図 5.14(c)は光強度プロファイルの印加電圧依存性を示す。光強度プロファイルは、透過光の中心軸を通り、偏向角方向に平行な直線で抽出した。グラフの色は印加電圧を意味する。偏向角度が大きいほど光強度が減少する傾向にあることが分かった。その原因として、線形なリタデーション分布にばらつきがあり、入射したすべての光が同じ偏向角で透過しなかったためだと考えられる。作製素子のリタデーション分布は全長約 1mm の範囲で線形であるが、局所的なばらつきがみられる（図 5.12 参照）。その大きさはリタデーション分布の傾きが大きいほど大きい。また、偏向角が大きいほど、光損失が大きい。このことから、局所的なリタデーションのばらつきが大きいほど、光損失が大きくなる。したがって、光損失は局所的なリタデーションのばらつきが一つの原因であると考えられる。さらなる露光条件の最適化やラビングによる配向縞が生じない材料の開発によって、この効率低下を低減が期待される。

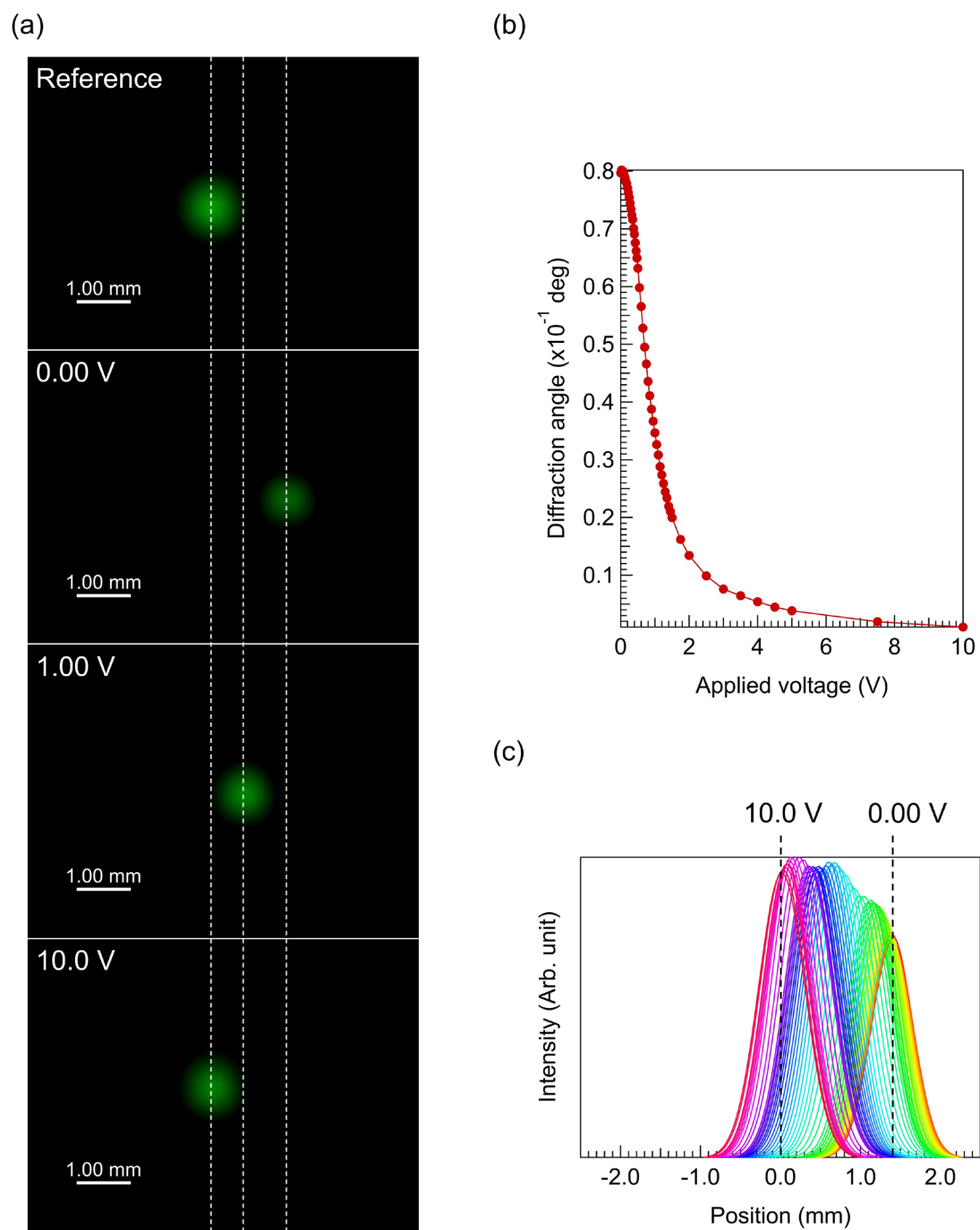


図 5.14 電圧印加時の透過光の偏向特性：(a) 上から順に、入射光像、印加電圧 0V および 1V、10V の時の透過光像、(b) 偏向角の印加電圧依存性、(c) 光強度プロファイルの印加電圧依存性

5.4 結言

本研究では、紫外線を用いて表面改質した垂直配向ポリイミド膜上の液晶配向挙動を評価し、紫外線照射量に依存してプレチルト角を自在に制御できることを明らかにした。さらに、紫外線照射量を空間的に制御することで、プレチルト角分布を有する液晶偏向素子を作製し、その電気光学特性を評価した。本研究で得られた知見を以下に要約する。

1. 垂直配向ポリイミド膜は、波長 200 nm および 265 nm に吸収ピークを持つことが分かった。紫外線照射後にリンス処理を行うことで吸光度スペクトルが減少したことから、リンス処理により光分解物が膜表面から除去されたと考えられる。
2. 紫外線照射した垂直配向ポリイミド膜の接触角および表面自由エネルギーは、紫外線の照射量（強度×時間）に依存して変化することが分かった。表面自由エネルギーの分子間相互作用成分のうち、分散成分は紫外線照射量の増加に対して一定であった。一方で極性成分（双極子相互作用成分および水素結合成分）は紫外線照射量の増加に対して単調増加することがわかった。
3. 紫外線照射した垂直配向ポリイミド膜上の液晶の配向挙動を調査し、紫外線照射量に依存してプレチルト角が約 90 度から約 0 度まで連続的に変化することが分かった。また、45 度付近の中間値でも安定した配向が得られた。プレチルト角の紫外線照射量依存性は線形な変化ではなく、S 字カーブを描いて変化することが分かった。
4. 紫外線照射量を空間的に制御することで、全長約 1.0 mm の線形なリタデーション分布が得られた。素子に電圧を印加すると、リタデーション分布は線形性を維持しながら減少することが分かった。
5. 線形なリタデーション分布を有する素子の透過光の挙動を評価した。入射直線偏光方位とラビング方位が垂直のとき透過光はそのまま直進し、平行のとき透過光は偏向した。電圧を印加すると偏向角度が変化した。したがって、電圧印加によりアクティブに透過光波面を変調可能であることが分かった。

第6章 結論

研究成果

本学位論文では、界面環境のパターン設計に基づく液晶波面制御デバイスの高機能化および新機能の開拓を目的とし、新たな素子構造やパターン設計手法を提案し、提案デバイスの動作実証を行った。以下に、各章で得られた知見を示す。

第 2 章では、パターン配向したネマティック液晶素子と一様配向したコレステリック液晶素子を組み合わせた液晶積層構造を提案し、提案デバイスを反射した光の円偏光成分に 2 倍異なるトポロジカルチャージを有する光渦が生成されることを明らかにし、素子同士のアラインメント調整なしに同軸光渦が生成可能なことを実証した。

第 3 章では、フォトリソグラフィ法を用いることで同一基板上に濡れ性の異なる 2 つの配向膜をパターン形成でき、液晶の垂直配向領域と水平配向領域を明瞭に分割可能なことを明らかにした（以下、親液撥液パターンニング）。さらに、親液撥液パターンニングを用いて液晶フレネルゾーンプレートを作製し、電圧印加により焦点距離を精密に制御可能なことを実証した。焦点距離の電圧感度は $3.6 \mu\text{m}/\text{mV}$ を達成し、ミリボルトオーダーの電圧変化に対して、マイクロメートルオーダーで焦点距離制御できることを明らかにした。また、入射偏光方位に依存して回折光強度を変調できることを明らかにした。

第 4 章では、親液撥液パターンニングを用いた液晶スパイラルゾーンプレートを提案し、単一素子構成で光渦の位相特異点とレンズ光軸が一致した集光光渦が生成できることを実証し、さらに従来主流であった振幅型スパイラルゾーンプレートに比べて約 2 倍の効率向上を達成した。また、電圧印加により回折効率を変調でき、回折状態と非回折状態をスイッチングできることを明らかにした。可視域において、焦点距離は理論値とほぼ一致することを明らかにした。

第 5 章では、紫外線照射したポリイミド膜の表面自由エネルギーを 3 つの分子間相互作用（分散成分および双極子相互作用成分、水素結合成分）に成分分解して評価し、また紫外線照射したポリイミド膜上の液晶配向挙動を観察し、これらの関係性を調査した。紫外線照射したポリイミド膜における表面自由エネルギーの紫外線照射依存性は、分子間相互作用成分ごとに異なり、特に、紫外線照射量の増加に伴い表面自由エネルギーの極性成分（双極子相互作用および水素結合成分）のみが変化することを見出した。液晶のプレチルト角は紫外線照射量の増加に伴い約 90 度から 0 度まで連続的に変化し、その依存性は表面自由エネルギーの紫外線照射量依存性に対応することが分かった。したがって、この結果は液晶と配向膜に働く分子間相互作用がプレチルト角の決定に重要な役割を果たしていることを示唆

している。さらに、紫外線照射量を空間的に制御することでプレチルト角分布を有する液晶偏向素子を作製し、その偏向動作を評価した。電圧無印加時に最も光を偏向し、印加電圧の大きさに応じて偏向角を連続的に変調できることを明らかにし、動的な波面変調を実証した。

以上をまとめると、本学位論文では、界面環境のパターン設計に基づく液晶波面制御デバイスにおいて、基板界面近傍における液晶の分子配向場を方位角方向と極角方向の二つのパラメーターで制御する新たな液晶配向パターンニング手法を提案し、デバイスの性能向上に加え、新たな波面制御機能の開拓につながることを示した。本研究は、液晶を用いた新たな光学アプリケーションへの貢献が期待される。

将来展望

本研究では、基板界面における液晶の配向自由度を向上させるための技術として、界面環境のパターン設計手法をいくつか提案し、紫外線表面改質したポリイミド配向膜において、紫外線照射量に応じて液晶のプレチルト角を制御可能なことを明らかにした。さらに、本手法を用いて液晶光学素子を作製し、透過光波面を動的に変調可能なことを実証した。本研究成果は、機械駆動部を全く必要とせずに動的な波面変調が可能な光学素子を、投影露光法などにより簡便かつ大面積に製造可能にするプラットフォームを提供する一要素技術として、その応用が期待される。以下では、本研究成果の具体的な社会実装像として、液晶レンズを用いた度数可変メガネへの応用について述べる。

機械駆動部を必要とせずに焦点距離を電氣的に変調できる液晶レンズは、近年、特に老眼患者向けの度数可変メガネとして、ヘルスケア分野での実用化が期待されている^[118, 195]。しかし、これまでの液晶レンズでは、基板間の電位分布を活用して液晶の分子配向場を空間的に制御する必要があり、そのためには基板上に複雑なパターン電極や高抵抗層を作り込む必要があった。この制約はデバイスの製造開発コストの増加を招き、効率的な研究開発の障壁となってきた。この課題に対して、本研究の成果は、複雑なパターン電極を必要としない液晶光学素子の技術を提供し、それによりデバイスの製造工程および設備を簡易化し、製造コストを低減させる可能性を提供する。

また、一般的なメガネに使用されるレンズの口径は約 50 mm 程度の大きさが求められ、多くのメガネユーザーには中程度以下の視力補正 (± 5 D) が必要とされている。従って、液晶レンズを用いた度数可変メガネを市場で普及させるためには、少なくとも口径 50 mm かつ度数 ± 5 D で安定に動作するレンズ素子を実現する必要がある。しかしながら、従来の液晶レンズでは、パターン電極のシート抵抗および透過率を維持するために少なくとも数 μm 以上の電極幅が必要であり、上記のスペックを満たすことが難しい状況であった。この課題に対して、本研究技術は、投影露光法などのフォトリソグラフィー技術を利用した製造プラットフォームを導入することで大面積かつ高精細なデバイス製造を可能とし、十分に市場の要求を満たす性能の達成が期待できる。

したがって、本研究成果は、液晶レンズを用いた度数可変メガネの社会実装にあたり、製造工程および設備の簡易化による製造コスト低減やデバイス性能の向上によるユーザービリティの改善というインパクトを与え、更なる波及効果としてヘルスケア分野だけでなく、様々な光産業分野への展開も期待できる。

参考文献

- [1] J. W. Goodby, “Introduction and Historical Developments”, In: *Handbook of Liquid Crystals*, Wiley (2014), pp. 1–23.
- [2] N. V. Tabiryan, D. E. Roberts, Z. Liao, J. Hwang, M. Moran, O. Ouskova, A. Pshenichnyi, J. Sigley, A. Tabirian, R. Vergara, L. De Sio, B. R. Kimball, D. M. Steeves, J. Slagle, M. E. McConney, and T. J. Bunning, “Advances in Transparent Planar Optics: Enabling Large Aperture, Ultrathin Lenses”, *Adv. Opt. Mater.*, **9**, 2001692 (2021).
- [3] F. Yaras, H. Kang, and L. Onural, “State of the Art in Holographic Displays: A Survey”, *J. Disp. Technol.*, **6**, 443 (2010).
- [4] G. Lazarev, A. Hermerschmidt, S. Krüger, and S. Osten, “LCOS Spatial Light Modulators: Trends and Applications”, In: *Optical Imaging and Metrology*, Wiley (2012), pp. 1–29.
- [5] W. M. Gibbons, P. J. Shannon, and S. T. Sun, “Optically Controlled Alignment of Liquid Crystals: Devices and Applications”, *Mol. Cryst. Liq. Cryst. Sci. Technol. Sect. A.*, **251**, 191 (1994).
- [6] M. J. Escuti, C. Oh, C. Sánchez, C. Bastiaansen, and D. J. Broer, “Simplified Spectropolarimetry Using Reactive Mesogen Polarization Gratings,” *Proc. SPIE, Imaging Spectrometry XI*, **6302**, 630207 (2006).
- [7] J. Tervo and J. Turunen, “Paraxial-Domain Diffractive Elements with 100% Efficiency Based on Polarization Gratings”, *Opt. Lett.*, **25**, 785 (2000).
- [8] L. Nikolova and T. Todorov, “Diffraction Efficiency and Selectivity of Polarization Holographic Recording”, *Opt. Acta Int. J. Opt.*, **31**, 579 (1984).
- [9] M. V. Berry, “The Adiabatic Phase and Pancharatnam’s Phase for Polarized Light”, *J. Mod. Opt.*, **34**, 1401 (1987).
- [10] S. Pancharatnam, “Generalized Theory of Interference, and Its Applications”, *Proc. Indian Acad. Sci. - Sect. A*, **44**, 247 (1956).
- [11] T. Zhan, J. Xiong, Y.-H. Lee, R. Chen, and S.-T. Wu, “Fabrication of Pancharatnam-Berry Phase Optical Elements with Highly Stable Polarization Holography”, *Opt. Express*, **27**, 2632 (2019).
- [12] L. Marrucci, C. Manzo, and D. Paparo, “Pancharatnam-Berry Phase Optical Elements for Wave Front Shaping in the Visible Domain: Switchable Helical Mode Generation”, *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 221102-1 (2006).
- [13] M. J. Escuti, J. Kim, and M. W. Kudenov, “Controlling Light with Geometric-Phase Holograms”, *Opt. Photonics News*, **27**, 22 (2016).

- [14] J. Kim, Y. Li, M. N. Miskiewicz, C. Oh, M. W. Kudenov, and M. J. Escuti, “Fabrication of Ideal Geometric-Phase Holograms with Arbitrary Wavefronts”, *Optica*, **2**, 958 (2015).
- [15] K. J. Hornburg, J. Kim, and M. J. Escuti, “Experimental Characterization of a F/1.5 Geometric-Phase Lens with High-Achromatic Efficiency and Low Aberration,” *Proc. SPIE, Emerging Liquid Crystal Technologies XII*, **10125**, 101250Y (2017).
- [16] L. Tan, “Liquid Crystal Polarization Gratings and Their Applications,” *Ph.D. Thesis*, The Hong Kong University of Science and Technology (2013).
- [17] G. P. Crawford, J. N. Eakin, M. D. Radcliffe, A. Callan-Jones, and R. A. Pelcovits, “Liquid-Crystal Diffraction Gratings Using Polarization Holography Alignment Techniques”, *J. Appl. Phys.*, **98**, 123102 (2005).
- [18] X. Xiang, J. Kim, R. Komanduri, and M. J. Escuti, “Nanoscale Liquid Crystal Polymer Bragg Polarization Gratings”, *Opt. Express*, **25**, 19298 (2017).
- [19] N. Tabiryan, G. Cipparronne, and T. J. Bunning, “Diffractive Waveplates: Introduction”, *J. Opt. Soc. Am. B*, **36**, DW1 (2019).
- [20] G. F. Walsh, L. De Sio, and N. Tabiryan, “Geometric Phase Diffractive Waveplate Singularity Arrays”, *J. Opt. Soc. Am. B*, **36**, D126 (2019).
- [21] M. Ono, J. Kobashi, H. Yoshida, and M. Ozaki, “Doubling the Geometric Phase of Reflective Pancharatnam–Berry Diffractive Waveplates”, *J. Opt. Soc. Am. B*, **36**, D20 (2019).
- [22] F. Gou, F. Peng, Q. Ru, Y.-H. Lee, H. Chen, Z. He, T. Zhan, K. L. Vodopyanov, and S.-T. Wu, “Mid-Wave Infrared Beam Steering Based on High-Efficiency Liquid Crystal Diffractive Waveplates”, *Opt. Express*, **25**, 22404 (2017).
- [23] K. Ichimura, Y. Suzuki, T. Seki, A. Hosoki, and K. Aoki, “Reversible Change in Alignment Mode of Nematic Liquid Crystals Regulated Photochemically by Command Surfaces Modified with an Azobenzene Monolayer”, *Langmuir*, **4**, 1214 (1988).
- [24] W. M. Gibbons, P. J. Shannon, S. Sun, and B. J. Swetlin, “Surface-Mediated Alignment of Nematic Liquid Crystals with Polarized Laser Light”, *Nature*, **351**, 49 (1991).
- [25] Y. Dyadyusha, A. Kozinkov, T. Marusii, and T. Reznikov, “Optically Induced Planar Orientation of Nematic Liquid Crystals on Anisotropic Surfaces without Microrelief”, *Ukr. Fiz. Zh.*, **36**, 1059 (1991).
- [26] M. Schadt, K. Schmitt, V. Kozinkov, and V. Chigrinov, “Surface-Induced Parallel Alignment of Liquid Crystals by Linearly Polymerized Photopolymers”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31**, 2155 (1992).

- [27] T. Seki, “New Strategies and Implications for the Photoalignment of Liquid Crystalline Polymers”, *Polym. J.*, **46**, 751 (2014).
- [28] E. A. Shteyner, A. K. Srivastava, V. G. Chigrinov, H.-S. Kwok, and A. D. Afanasyev, “Submicron-Scale Liquid Crystal Photo-Alignment”, *Soft Matter*, **9**, 5160 (2013).
- [29] K. Gao, C. McGinty, H. Payson, S. Berry, J. Vornehm, V. Finnemeyer, B. Roberts, and P. Bos, “High-Efficiency Large-Angle Pancharatnam Phase Deflector Based on Dual-Twist Design”, *Opt. Express*, **25**, 6283 (2017).
- [30] H. Cheng, A. K. Bhowmik, and P. J. Bos, “Analysis of a Dual-Twist Pancharatnam Phase Device with Ultrahigh-Efficiency Large-Angle Optical Beam Steering”, *Appl. Opt.*, **54**, 10035 (2015).
- [31] I. Nys, M. Stebryte, Y. Y. Ussembayev, J. Beeckman, and K. Neyts, “Tilted Chiral Liquid Crystal Gratings for Efficient Large-Angle Diffraction”, *Adv. Opt. Mater.*, **7**, 1901364 (2019).
- [32] C. Oh and M. J. Escuti, “Achromatic Polarization Gratings as Highly Efficient Thin-Film Polarizing Beamsplitters for Broadband Light,” *Proc. SPIE, Polarization Science and Remote Sensing III*, **6682**, 668211 (2007).
- [33] C. Oh and M. J. Escuti, “Achromatic Diffraction from Polarization Gratings with High Efficiency”, *Opt. Lett.*, **33**, 2287 (2008).
- [34] R. K. Komanduri, K. F. Lawler, and M. J. Escuti, “Multi-Twist Retarders: Broadband Retardation Control Using Self-Aligning Reactive Liquid Crystal Layers”, *Opt. Express*, **21**, 404 (2013).
- [35] R. K. Komanduri, J. Kim, K. F. Lawler, and M. J. Escuti, “Multi-Twist Retarders for Broadband Polarization Transformation,” *Proc. SPIE, Emerging Liquid Crystal Technologies VII*, **8279**, 82790E (2012).
- [36] M. J. Escuti, “Multi-Layer Achromatic Liquid Crystal Polarization Gratings and Related Fabrication Methods”, *United States Pat.*, **US 8,305,5** (2012).
- [37] J. Kim, C. Oh, M. J. Escuti, L. Hosting, and S. Serati, “Wide-Angle Nonmechanical Beam Steering Using Thin Liquid Crystal Polarization Gratings,” *Proc. SPIE, Advanced wavefront control: methods, devices, and applications VI.*, **7093**, 709302 (2008).
- [38] J. Kim, M. N. Miskiewicz, S. Serati, and M. J. Escuti, Demonstration of Large-Angle Nonmechanical Laser Beam Steering Based on LC Polymer Polarization Gratings, *Acquisition, Tracking, Pointing, and Laser Systems Technologies XXV*, **8052**, 80520T. p. 80520T, 2011.

- [39] J. Kim, M. N. Miskiewicz, S. Serati, and M. J. Escuti, “Nonmechanical Laser Beam Steering Based on Polymer Polarization Gratings: Design Optimization and Demonstration”, *J. Light. Technol.*, **33**, 2068 (2015).
- [40] J. Kobashi, H. Yoshida, and M. Ozaki, “Planar Optics with Patterned Chiral Liquid Crystals”, *Nat. Photonics*, **10**, 389 (2016).
- [41] J. Kobashi, “Wavefront Control Using Cholesteric Liquid Crystals,” *Ph.D. Thesis*, Osaka University (2017).
- [42] I. V. Kasyanova, M. V. Gorkunov, V. V. Artemov, A. R. Geivandov, A. V. Mamonova, and S. P. Palto, “Liquid Crystal Metasurfaces on Micropatterned Polymer Substrates”, *Opt. Express*, **26**, 20258 (2018).
- [43] I. Kasyanova, M. Gorkunov, V. Artemov, A. Mamonova, A. Ezhov, A. Geivandov, and S. Palto, “Switchable Optical Metasurfaces Based on Nematic Liquid Crystal,” *Proc. SPIE, Metamaterials XII*, **110250N**, 110250N-1 (2019).
- [44] M. V. Gorkunov, I. V. Kasyanova, V. V. Artemov, A. V. Mamonova, and S. P. Palto, “Precise Local Control of Liquid Crystal Pretilt on Polymer Layers by Focused Ion Beam Nanopatterning”, *Beilstein J. Nanotechnol.*, **10**, 1691 (2019).
- [45] M. V. Gorkunov, I. V. Kasyanova, V. V. Artemov, A. A. Ezhov, A. V. Mamonova, I. V. Simdyankin, and S. P. Palto, “Liquid-Crystal Metasurfaces Self-Assembled on Focused Ion Beam Patterned Polymer Layers: Electro-Optical Control of Light Diffraction and Transmission”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **12**, 30815 (2020).
- [46] M. V. Gorkunov, I. V. Kasyanova, V. V. Artemov, A. A. Ezhov, A. V. Mamonova, I. V. Simdyankin, and S. P. Palto, “Superperiodic Liquid-Crystal Metasurfaces for Electrically Controlled Anomalous Refraction”, *ACS Photonics*, **7**, 3096 (2020).
- [47] M. V. Gorkunov, I. V. Kasyanova, V. V. Artemov, A. A. Ezhov, A. V. Mamonova, I. V. Simdyankin, and S. P. Palto, Self-Assembled Liquid-Crystal-Metasurfaces Controlling Deflection and Retardation of Light, *OSA Advanced Photonics Congress (AP) 2020 (IPR, NP, NOMA, Networks, PVLED, PSC, SPPCom, SOF)*, **Part F186-**, NoTu3C.4. Optica Publishing Group, p. NoTu3C.4, 2020.
- [48] M. V. Gorkunov, I. V. Kasyanova, V. V. Artemov, A. A. Ezhov, A. V. Mamonova, I. V. Simdyankin, and S. P. Palto, “Millisecond-Fast Electro-Optics of Liquid-Crystal-Metasurfaces,” *AIP Conf. Proc.*, 2300, 020040-1 (2020).
- [49] V. V. Artemov, D. N. Khmelinin, A. V. Mamonova, M. V. Gorkunov, and A. A. Ezhov, “Microscopic Studies of Alignment Layers Processed by a Focused Ion Beam for the Creation of Liquid Crystal Metasurfaces”, *Crystallogr. Reports*, **66**, 673 (2021).

- [50] I. V. Kasyanova, M. V. Gorkunov, and S. P. Palto, “Liquid-Crystal Metasurfaces: Self-Assembly for Versatile Optical Functionality”, *Europhys. Lett.*, **136**, 24001 (2021).
- [51] M. V Gorkunov, A. V Mamonova, I. V Kasyanova, A. A. Ezhov, V. V. Artemov, I. V Simdyankin, and A. R. Geivandov, “Double-Sided Liquid Crystal Metasurfaces for Electrically and Mechanically Controlled Broadband Visible Anomalous Refraction”, *Nanophotonics*, **11**, 3901 (2022).
- [52] S. Jeng, S. Hwang, J. Horng, and K. Lin, “Electrically Switchable Liquid Crystal Fresnel Lens Using UV-Modified Alignment Film”, *Opt. Express*, **18**, 26325 (2010).
- [53] N. Bozinovic, Y. Yue, Y. Ren, M. Tur, P. Kristensen, H. Huang, A. E. Willner, and S. Ramachandran, “Terabit-Scale Orbital Angular Momentum Mode Division Multiplexing in Fibers”, *Science*, **340**, 1545 (2013).
- [54] Z. Xie, T. Lei, F. Li, H. Qiu, Z. Zhang, H. Wang, C. Min, L. Du, Z. Li, and X. Yuan, “Ultra-Broadband on-Chip Twisted Light Emitter for Optical Communications”, *Light Sci. Appl.*, **7**, 18001 (2018).
- [55] J. Wang, “Advances in Communications Using Optical Vortices”, *Photonics Res.*, **4**, B14 (2016).
- [56] A. E. Willner, H. Huang, Y. Yan, Y. Ren, N. Ahmed, G. Xie, C. Bao, L. Li, Y. Cao, Z. Zhao, J. Wang, M. P. J. Lavery, M. Tur, S. Ramachandran, A. F. Molisch, N. Ashrafi, and S. Ashrafi, “Optical Communications Using Orbital Angular Momentum Beams”, *Adv. Opt. Photonics*, **7**, 66 (2015).
- [57] J. Wang, J. Yang, I. M. Fazal, N. Ahmed, Y. Yan, H. Huang, Y. Ren, Y. Yue, S. Dolinar, M. Tur, and A. E. Willner, “Terabit Free-Space Data Transmission Employing Orbital Angular Momentum Multiplexing”, *Nat. Photonics*, **6**, 488 (2012).
- [58] A. Wang, L. Zhu, L. Wang, J. Ai, S. Chen, and J. Wang, “Directly Using 88-Km Conventional Multi-Mode Fiber for 6-Mode Orbital Angular Momentum Multiplexing Transmission”, *Opt. Express*, **26**, 10038 (2018).
- [59] D. J. Richardson, J. M. Fini, and L. E. Nelson, “Space-Division Multiplexing in Optical Fibres”, *Nat. Photonics*, **7**, 354 (2013).
- [60] C. Shi, M. Dubois, Y. Wang, and X. Zhang, “High-Speed Acoustic Communication by Multiplexing Orbital Angular Momentum”, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **114**, 7250 (2017).
- [61] H. Huang, G. Xie, Y. Yan, N. Ahmed, Y. Ren, Y. Yue, D. Rogawski, M. J. Willner, B. I. Erkmen, K. M. Birnbaum, S. J. Dolinar, M. P. J. Lavery, M. J. Padgett, M. Tur, and A. E. Willner, “100 Tbit/s Free-Space Data Link Enabled by Three-Dimensional Multiplexing of Orbital Angular Momentum, Polarization, and Wavelength”, *Opt. Lett.*, **39**, 197 (2014).

- [62] K. Toyoda, F. Takahashi, S. Takizawa, Y. Tokizane, K. Miyamoto, R. Morita, and T. Omatsu, “Transfer of Light Helicity to Nanostructures”, *Phys. Rev. Lett.*, **110**, 143603 (2013).
- [63] K. K. Anoop, A. Rubano, R. Fittipaldi, X. Wang, D. Paparo, A. Vecchione, L. Marrucci, R. Bruzzese, and S. Amoroso, “Femtosecond Laser Surface Structuring of Silicon Using Optical Vortex Beams Generated by a Q-Plate”, *Appl. Phys. Lett.*, **104** (2014).
- [64] F. Takahashi, K. Miyamoto, H. Hidai, K. Yamane, R. Morita, and T. Omatsu, “Picosecond Optical Vortex Pulse Illumination Forms a Monocrystalline Silicon Needle”, *Sci. Rep.*, **6**, 21738 (2016).
- [65] T. Omatsu, K. Miyamoto, K. Toyoda, R. Morita, Y. Arita, and K. Dholakia, “A New Twist for Materials Science: The Formation of Chiral Structures Using the Angular Momentum of Light”, *Adv. Opt. Mater.*, **7**, 1801672 (2019).
- [66] T. Omatsu, K. Chujo, K. Miyamoto, M. Okida, K. Nakamura, N. Aoki, and R. Morita, “Metal Microneedle Fabrication Using Twisted Light with Spin”, *Opt. Express*, **18**, 17967 (2010).
- [67] D. Barada, G. Juman, I. Yoshida, K. Miyamoto, S. Kawata, S. Ohno, and T. Omatsu, “Constructive Spin-Orbital Angular Momentum Coupling Can Twist Materials to Create Spiral Structures in Optical Vortex Illumination”, *Appl. Phys. Lett.*, **108** (2016).
- [68] M. G. Rahimian, F. Bouchard, H. Al-Khazraji, E. Karimi, P. B. Corkum, and V. R. Bhardwaj, “Polarization Dependent Nanostructuring of Silicon with Femtosecond Vortex Pulse”, *APL Photonics*, **2**, 086104 (2017).
- [69] M. Watabe, G. Juman, K. Miyamoto, and T. Omatsu, “Light Induced Conch-Shaped Relief in an Azo-Polymer Film”, *Sci. Rep.*, **4**, 4281 (2014).
- [70] S. Syubaev, A. Zhizhchenko, A. Kuchmizhak, A. Porfirev, E. Pustovalov, O. Vitrik, Y. Kulchin, S. Khonina, and S. Kudryashov, “Direct Laser Printing of Chiral Plasmonic Nanojets by Vortex Beams”, *Opt. Express*, **25**, 10214 (2017).
- [71] K. Masuda, R. Shinozaki, Y. Kinezuka, J. Lee, S. Ohno, S. Hashiyada, H. Okamoto, D. Sakai, K. Harada, K. Miyamoto, and T. Omatsu, “Nanoscale Chiral Surface Relief of Azo-Polymers with Nearfield OAM Light”, *Opt. Express*, **26**, 22197 (2018).
- [72] D. G. Grier, “A Revolution in Optical Manipulation”, *Nature*, **424**, 810 (2003).
- [73] J. Ng, Z. Lin, and C. T. Chan, “Theory of Optical Trapping by an Optical Vortex Beam”, *Phys. Rev. Lett.*, **104**, 103601 (2010).
- [74] K. T. Gahagan and G. A. Swartzlander, “Optical Vortex Trapping of Particles”, *Opt. Lett.*, **21**, 827 (1996).

- [75] Y. Shen, X. Wang, Z. Xie, C. Min, X. Fu, Q. Liu, M. Gong, and X. Yuan, “Optical Vortices 30 Years on: OAM Manipulation from Topological Charge to Multiple Singularities”, *Light Sci. Appl.*, **8**, 90 (2019).
- [76] L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, and J. P. Woerdman, “Orbital Angular Momentum of Light and the Transformation of Laguerre-Gaussian Laser Modes”, *Phys. Rev. A*, **45**, 8185 (1992).
- [77] X. Wang, Z. Nie, Y. Liang, J. Wang, T. Li, and B. Jia, “Recent Advances on Optical Vortex Generation”, *Nanophotonics*, **7**, 1533 (2018).
- [78] R. Fickler, G. Campbell, B. Buchler, P. K. Lam, and A. Zeilinger, “Quantum Entanglement of Angular Momentum States with Quantum Numbers up to 10,010”, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, **113**, 13642 (2016).
- [79] J. Ni, C. Wang, C. Zhang, Y. Hu, L. Yang, Z. Lao, B. Xu, J. Li, D. Wu, and J. Chu, “Three-Dimensional Chiral Microstructures Fabricated by Structured Optical Vortices in Isotropic Material”, *Light Sci. Appl.*, **6**, e17011 (2017).
- [80] K. Toyoda, K. Miyamoto, N. Aoki, R. Morita, and T. Omatsu, “Using Optical Vortex To Control the Chirality of Twisted Metal Nanostructures”, *Nano Lett.*, **12**, 3645 (2012).
- [81] K. Dholakia and T. Čižmár, “Shaping the Future of Manipulation”, *Nat. Photonics*, **5**, 335 (2011).
- [82] Y. Chen, Z.-X. Fang, Y.-X. Ren, L. Gong, and R.-D. Lu, “Generation and Characterization of a Perfect Vortex Beam with a Large Topological Charge through a Digital Micromirror Device”, *Appl. Opt.*, **54**, 8030 (2015).
- [83] A. S. Ostrovsky, C. Rickenstorff-Parrao, and V. Arrizón, “Generation of the “Perfect” Optical Vortex Using a Liquid-Crystal Spatial Light Modulator”, *Opt. Lett.*, **38**, 534 (2013).
- [84] A. Forbes, A. Dudley, and M. McLaren, “Creation and Detection of Optical Modes with Spatial Light Modulators”, *Adv. Opt. Photonics*, **8**, 200 (2016).
- [85] Y. Liu, Y. Ke, J. Zhou, Y. Liu, H. Luo, S. Wen, and D. Fan, “Generation of Perfect Vortex and Vector Beams Based on Pancharatnam-Berry Phase Elements”, *Sci. Rep.*, **7**, 44096 (2017).
- [86] J. Ni, C. Huang, L.-M. Zhou, M. Gu, Q. Song, Y. Kivshar, and C.-W. Qiu, “Multidimensional Phase Singularities in Nanophotonics.”, *Science*, **374**, eabj0039 (2021).
- [87] E. Ostrovsky, K. Cohen, S. Tsesses, B. Gjonaj, and G. Bartal, “Nanoscale Control over Optical Singularities”, *Optica*, **5**, 283 (2018).

-
- [88] A. Trichili, K.-H. Park, M. Zghal, B. S. Ooi, and M.-S. Alouini, “Communicating Using Spatial Mode Multiplexing: Potentials, Challenges, and Perspectives”, *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, **21**, 3175 (2019).
 - [89] M. W. Beijersbergen, R. P. C. Coerwinkel, M. Kristensen, and J. P. Woerdman, “Helical-Wavefront Laser Beams Produced with a Spiral Phaseplate”, *Opt. Commun.*, **112**, 321 (1994).
 - [90] N. Yu, P. Genevet, M. a Kats, F. Aieta, J.-P. Tetienne, F. Capasso, and Z. Gaburro, “Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction.”, *Science*, **334**, 333 (2011).
 - [91] M. Q. Mehmood, S. Mei, S. Hussain, K. Huang, S. Y. Siew, L. Zhang, T. Zhang, X. Ling, H. Liu, J. Teng, A. Danner, S. Zhang, and C. Qiu, “Visible-Frequency Metasurface for Structuring and Spatially Multiplexing Optical Vortices”, *Adv. Mater.*, **28**, 2533 (2016).
 - [92] B. Zhen, C. W. Hsu, L. Lu, A. D. Stone, and M. Soljačić, “Topological Nature of Optical Bound States in the Continuum”, *Phys. Rev. Lett.*, **113**, 257401 (2014).
 - [93] S. Zheng and J. Wang, “On-Chip Orbital Angular Momentum Modes Generator and (de)Multiplexer Based on Trench Silicon Waveguides”, *Opt. Express*, **25**, 18492 (2017).
 - [94] Y. Chen, K.-Y. Xia, W.-G. Shen, J. Gao, Z.-Q. Yan, Z.-Q. Jiao, J.-P. Dou, H. Tang, Y.-Q. Lu, and X.-M. Jin, “Vector Vortex Beam Emitter Embedded in a Photonic Chip”, *Phys. Rev. Lett.*, **124**, 153601 (2020).
 - [95] A. Rubano, F. Cardano, B. Piccirillo, and L. Marrucci, “Q-Plate Technology: A Progress Review”, *J. Opt. Soc. Am. B*, **36**, D70 (2019).
 - [96] B. Piccirillo, V. D’Ambrosio, S. Slussarenko, L. Marrucci, and E. Santamato, “Photon Spin-to-Orbital Angular Momentum Conversion via an Electrically Tunable q-Plate”, *Appl. Phys. Lett.*, **97**, 4085 (2010).
 - [97] L. Marrucci, “The Q-Plate and Its Future”, *J. Nanophotonics*, **7**, 078598 (2013).
 - [98] L. Marrucci, C. Manzo, and D. Paparo, “Optical Spin-to-Orbital Angular Momentum Conversion in Inhomogeneous Anisotropic Media”, *Phys. Rev. Lett.*, **96**, 163905 (2006).
 - [99] H. Rubinsztein-Dunlop, A. Forbes, M. V. Berry, M. R. Dennis, D. L. Andrews, M. Mansuripur, C. Denz, C. Alpmann, P. Banzer, T. Bauer, E. Karimi, L. Marrucci, M. Padgett, M. Ritsch-Marte, N. M. Litchinitser, N. P. Bigelow, C. Rosales-Guzmán, A. Belmonte, J. P. Torres, T. W. Neely, M. Baker, R. Gordon, A. B. Stilgoe, J. Romero, A. G. White, R. Fickler, A. E. Willner, G. Xie, B. McMorran, and A. M. Weiner, “Roadmap on Structured Light”, *J. Opt.*, **19**, 013001 (2017).
 - [100] D. Yang and S. Wu, “Fundamentals of Liquid Crystal Devices”, *John Wiley & Sons* (2014).

- [101] J. F. Nye and M. V. Berry, “Dislocations in Wave Trains”, *Proc. R. Soc. London. A. Math. Phys. Sci.*, **336**, 165 (1974).
- [102] M. Padgett and R. Bowman, “Tweezers with a Twist”, *Nat. Photonics*, **5**, 343 (2011).
- [103] M. Xu and L. V. Wang, “Photoacoustic Imaging in Biomedicine”, *Rev. Sci. Instrum.*, **77**, 041101 (2006).
- [104] E. Caló and V. V. Khutoryanskiy, “Biomedical Applications of Hydrogels: A Review of Patents and Commercial Products”, *Eur. Polym. J.*, **65**, 252 (2015).
- [105] W. T. Xie, Y. J. Dai, R. Z. Wang, and K. Sumathy, “Concentrated Solar Energy Applications Using Fresnel Lenses: A Review”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **15**, 2588 (2011).
- [106] V. Kumar, R. L. Shrivastava, and S. P. Untawale, “Fresnel Lens: A Promising Alternative of Reflectors in Concentrated Solar Power”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **44**, 376 (2015).
- [107] T. Wu, C. Sher, Y. Lin, C. Lee, S. Liang, Y. Lu, S.-W. Huang Chen, W. Guo, H. Kuo, and Z. Chen, “Mini-LED and Micro-LED: Promising Candidates for the Next Generation Display Technology”, *Appl. Sci.*, **8**, 1557 (2018).
- [108] Y.-H. Lin, Y.-J. Wang, and V. Reshetnyak, “Liquid Crystal Lenses with Tunable Focal Length”, *Liq. Cryst. Rev.*, **5**, 111 (2017).
- [109] N.-T. Nguyen, “Micro-Optofluidic Lenses: A Review”, *Biomicrofluidics*, **4**, 031501 (2010).
- [110] S. M. Mirvakili and I. W. Hunter, “Artificial Muscles: Mechanisms, Applications, and Challenges”, *Adv. Mater.*, **30**, 1704407 (2018).
- [111] M. L. Tseng, H. Hsiao, C. H. Chu, M. K. Chen, G. Sun, A. Liu, and D. P. Tsai, “Metalenses: Advances and Applications”, *Adv. Opt. Mater.*, **6**, 1800554 (2018).
- [112] M. Kawamura, M. Ye, and S. Sato, “Optical Trapping and Manipulation System Using Liquid-Crystal Lens with Focusing and Deflection Properties”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44**, 6098 (2005).
- [113] P. J. W. Hands, S. A. Tatarkova, A. K. Kirby, and G. D. Love, “Modal Liquid Crystal Devices in Optical Tweezing: 3D Control and Oscillating Potential Wells”, *Opt. Express*, **14**, 4525 (2006).
- [114] G. Li, D. L. Mathine, P. Valley, P. Äyräs, J. N. Haddock, M. S. Giridhar, G. Williby, J. Schwiegerling, G. R. Meredith, B. Kippelen, S. Honkanen, and N. Peyghambarian, “Switchable Electro-Optic Diffractive Lens with High Efficiency for Ophthalmic Applications”, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **103**, 6100 (2006).

- [115] G. Shibuya, H. Yoshida, and M. Ozaki, “High-Speed Driving of Liquid Crystal Lens with Weakly Conductive Thin Films and Voltage Booster”, *Appl. Opt.*, **54**, 8145 (2015).
- [116] L. Begel and T. Galstian, “Liquid Crystal Lens with Corrected Wavefront Asymmetry”, *Appl. Opt.*, **57**, 5072 (2018).
- [117] A. Jamali, D. Bryant, Y. Zhang, A. Grunnet-Jepsen, A. Bhowmik, and P. J. Bos, “Design of a Large Aperture Tunable Refractive Fresnel Liquid Crystal Lens”, *Appl. Opt.*, **57**, B10 (2018).
- [118] A. Jamali, D. Bryant, A. K. Bhowmick, and P. J. Bos, “Large Area Liquid Crystal Lenses for Correction of Presbyopia”, *Opt. Express*, **28**, 33982 (2020).
- [119] J. Xiong, E.-L. Hsiang, Z. He, T. Zhan, and S.-T. Wu, “Augmented Reality and Virtual Reality Displays: Emerging Technologies and Future Perspectives”, *Light Sci. Appl.*, **10**, 216 (2021).
- [120] T. Zhan, Y.-H. Lee, G. Tan, J. Xiong, K. Yin, F. Gou, J. Zou, N. Zhang, D. Zhao, J. Yang, S. Liu, and S.-T. Wu, “Pancharatnam–Berry Optical Elements for Head-up and near-Eye Displays”, *J. Opt. Soc. Am. B*, **36**, D52 (2019).
- [121] Z. He, X. Sui, G. Jin, and L. Cao, “Progress in Virtual Reality and Augmented Reality Based on Holographic Display”, *Appl. Opt.*, **58**, A74 (2019).
- [122] Y.-J. Wang and Y.-H. Lin, “Liquid Crystal Technology for Vergence-Accommodation Conflicts in Augmented Reality and Virtual Reality Systems: A Review”, *Liq. Cryst. Rev.*, **9**, 35 (2021).
- [123] M. Kawamura, H. Umeda, J. Onishi, M. Ye, and S. Sato, “Laser Manipulator for Rotating Microscopic Trapped Particles by Using Liquid Crystal Optical Devices”, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **488**, 238 (2008).
- [124] M. Kawamura, M. Ye, and S. Sato, “Optical Tweezers System by Using a Liquid Crystal Optical Device”, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **478**, 135/[891] (2007).
- [125] M. Kawamura, M. Ye, and S. Sato, “Optical Particle Manipulation Using an LC Device with Eight-Divided Circularly Hole-Patterned Electrodes”, *Opt. Express*, **16**, 10059 (2008).
- [126] M. Kawamura, H. Umeda, and S. Sato, “Optical Trap for Manipulating Plural Particles by Using a Liquid Crystal Device”, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **510**, 191/[1325] (2009).
- [127] R. S. Rodrigues Ribeiro, P. Dahal, A. Guerreiro, P. A. S. S. Jorge, and J. Viegas, “Fabrication of Fresnel Plates on Optical Fibres by FIB Milling for Optical Trapping, Manipulation and Detection of Single Cells”, *Sci. Rep.*, **7**, 4485 (2017).

- [128] J. Shi, Z. Stratton, S.-C. S. Lin, H. Huang, and T. J. Huang, “Tunable Optofluidic Microlens through Active Pressure Control of an Air–Liquid Interface”, *Microfluid. Nanofluidics*, **9**, 313 (2010).
- [129] H. Wang, A. Enders, J.-A. Preuss, J. Bahnemann, A. Heisterkamp, and M. L. Torres-Mapa, “3D Printed Microfluidic Lab-on-a-Chip Device for Fiber-Based Dual Beam Optical Manipulation”, *Sci. Rep.*, **11**, 14584 (2021).
- [130] X. Li, L. Wei, R. H. Poelma, S. Vollebregt, J. Wei, H. P. Urbach, P. M. Sarro, and G. Q. Zhang, “Stretchable Binary Fresnel Lens for Focus Tuning”, *Sci. Rep.*, **6**, 25348 (2016).
- [131] S. Pang, C. Han, L. M. Lee, and C. Yang, “Fluorescence Microscopy Imaging with a Fresnel Zone Plate Array Based Optofluidic Microscope”, *Lab Chip*, **11**, 3698 (2011).
- [132] M. J. Moghimi, J. Fernandes, A. Kanhere, and H. Jiang, “Micro-Fresnel-Zone-Plate Array on Flexible Substrate for Large Field-of-View and Focus Scanning”, *Sci. Rep.*, **5**, 15861 (2015).
- [133] J. S. Patel and K. Rastani, “Electrically Controlled Polarization-Independent Liquid-Crystal Fresnel Lens Arrays.”, *Opt. Lett.*, **16**, 532 (1991).
- [134] M. Young, “Zone Plates and Their Aberrations”, *J. Opt. Soc. Am.*, **62**, 972 (1972).
- [135] K. Huang, F. Qin, H. Liu, H. Ye, C. Qiu, M. Hong, B. Luk’yanchuk, and J. Teng, “Planar Diffractive Lenses: Fundamentals, Functionalities, and Applications”, *Adv. Mater.*, **30**, 1704556 (2018).
- [136] H. Kim, J. Kim, H. An, Y. Lee, G. Lee, J. Na, K. Park, S. Lee, S.-Y. Lee, B. Lee, and Y. Jeong, “Metallic Fresnel Zone Plate Implemented on an Optical Fiber Facet for Super-Variable Focusing of Light”, *Opt. Express*, **25**, 30290 (2017).
- [137] Y. Zhou, R. Ji, J. Teng, and M. Hong, “Wavelength-Tunable Focusing via a Fresnel Zone Microsphere”, *Opt. Lett.*, **45**, 852 (2020).
- [138] Y. Zhou and M. Hong, “Formation of a Three-Dimensional Bottle Beam via an Engineered Microsphere”, *Photonics Res.*, **9**, 1598 (2021).
- [139] Y. Zhou and M. Hong, “Formation of Polarization-Dependent Optical Vortex Beams via an Engineered Microsphere”, *Opt. Express*, **29**, 11121 (2021).
- [140] L.-C. Lin, H. Jau, T. Lin, and A. Y. Fuh, “Highly Efficient and Polarization-Independent Fresnel Lens Based on Dye-Doped Liquid Crystal”, *Opt. Express*, **15**, 2900 (2007).
- [141] S. Jeng, S. Hwang, T.-A. Chen, H. Liu, and M. Chen, “Controlling the Alignment of Liquid Crystals by Nanoparticle-Doped and UV-Treated Polyimide Alignment Films,” *Proc. SPIE, Emerging Liquid Crystal Technologies VII*, **8279**, 827912-1 (2012).

-
- [142] S.-J. Hwang, T.-A. Chen, K.-R. Lin, and S.-C. Jeng, “Ultraviolet-Light-Treated Polyimide Alignment Layers for Polarization-Independent Liquid Crystal Fresnel Lenses”, *Appl. Phys. B*, **107**, 151 (2012).
 - [143] X.-Q. Wang, A. K. Srivastava, V. G. Chigrinov, and H. Kwok, “Switchable Fresnel Lens Based on Micropatterned Alignment”, *Opt. Lett.*, **38**, 1775 (2013).
 - [144] X. Wang, A. K. Srivastava, V. G. Chigrinov, and H. Kwok, “Liquid Crystal Fresnel Zone Lens Based on Single-Side Patterned Photoalignment Layer”, *SID Symp. Dig. Tech. Pap.*, **45**, 1367 (2014).
 - [145] X.-Q. Wang, W.-Q. Yang, Z. Liu, W. Duan, W. Hu, Z.-G. Zheng, D. Shen, V. G. Chigrinov, and H.-S. Kwok, “Switchable Fresnel Lens Based on Hybrid Photo-Aligned Dual Frequency Nematic Liquid Crystal”, *Opt. Mater. Express*, **7**, 8 (2017).
 - [146] E. I. L. Jull, M. Wahle, P. J. M. Wyatt, C. Ellis, S. J. Cowling, J. W. Goodby, K. Usami, and H. F. Gleeson, “Efficiency Improvements in a Dichroic Dye-Doped Liquid Crystal Fresnel Lens”, *Opt. Express*, **27**, 26799 (2019).
 - [147] B. Lee and N. A. Clark, “Alignment of Liquid Crystals with Patterned Isotropic Surfaces”, *Science*, **291**, 2576 (2001).
 - [148] J. Hamazaki, R. Morita, K. Chujo, Y. Kobayashi, S. Tanda, and T. Omatsu, “Optical-Vortex Laser Ablation”, *Opt. Express*, **18**, 2144 (2010).
 - [149] G. Gibson, J. Courtial, M. J. Padgett, M. Vasnetsov, V. Pas’ko, S. M. Barnett, and S. Franke-Arnold, “Free-Space Information Transfer Using Light Beams Carrying Orbital Angular Momentum”, *Opt. Express*, **12**, 5448 (2004).
 - [150] H. H. Barrett, W. W. Stoner, D. T. Wilson, and G. D. DeMeester, “Coded Apertures Derived From The Fresnel Zone Plate,” *Opt. Eng.*, **13**, 122 (1974).
 - [151] A. Sakdinawat and Y. Liu, “Soft-x-Ray Microscopy Using Spiral Zone Plates”, *Opt. Lett.*, **32**, 2635 (2007).
 - [152] Y. Zhou, S. Feng, S. Nie, J. Ma, and C. Yuan, “Anisotropic Edge Enhancement with Spiral Zone Plate under Femtosecond Laser Illumination”, *Appl. Opt.*, **56**, 2641 (2017).
 - [153] A. M. Yao and M. J. Padgett, “Orbital Angular Momentum: Origins, Behavior and Applications”, *Adv. Opt. Photonics*, **3**, 161 (2011).
 - [154] N. R. Heckenberg, R. McDuff, C. P. Smith, and A. G. White, “Generation of Optical Phase Singularities by Computer-Generated Holograms”, *Opt. Lett.*, **17**, 221 (1992).
 - [155] M. Werner, F. Merenda, J. Piguet, R.-P. Salathé, and H. Vogel, “Microfluidic Array Cytometer Based on Refractive Optical Tweezers for Parallel Trapping, Imaging and Sorting of Individual Cells”, *Lab Chip*, **11**, 2432 (2011).

- [156] D. Schäffner, T. Preuschoff, S. Ristok, L. Brozio, M. Schlosser, H. Giessen, and G. Birkel, “Arrays of Individually Controllable Optical Tweezers Based on 3D-Printed Microlens Arrays”, *Opt. Express*, **28**, 8640 (2020).
- [157] C. H. Sow, A. A. Bettiol, Y. Y. G. Lee, F. C. Cheong, C. T. Lim, and F. Watt, “Multiple-Spot Optical Tweezers Created with Microlens Arrays Fabricated by Proton Beam Writing”, *Appl. Phys. B*, **78**, 705 (2004).
- [158] A. Atajanov, A. Zhbanov, and S. Yang, “Sorting and Manipulation of Biological Cells and the Prospects for Using Optical Forces”, *Micro Nano Syst. Lett.*, **6**, 2 (2018).
- [159] D. V. Hahn, D. M. Brown, N. W. Rolander, J. E. Sluz, and R. Venkat, “Fiber Optic Bundle Array Wide Field-of-View Optical Receiver for Free Space Optical Communications”, *Opt. Lett.*, **35**, 3559 (2010).
- [160] J. Wu, X. Cui, G. Zheng, Y. M. Wang, L. M. Lee, and C. Yang, “Wide Field-of-View Microscope Based on Holographic Focus Grid Illumination”, *Opt. Lett.*, **35**, 2188 (2010).
- [161] Z.-N. Tian, J.-G. Hua, J. Hao, Y.-H. Yu, Q.-D. Chen, and H.-B. Sun, “Micro-Buried Spiral Zone Plate in a Lithium Niobate Crystal”, *Appl. Phys. Lett.*, **110** (2017).
- [162] H. Liu, M. Q. Mehmood, K. Huang, L. Ke, H. Ye, P. Genevet, M. Zhang, A. Danner, S. P. Yeo, C. Qiu, and J. Teng, “Twisted Focusing of Optical Vortices with Broadband Flat Spiral Zone Plates”, *Adv. Opt. Mater.*, **2**, 1193 (2014).
- [163] K. Saitoh, Y. Hasegawa, N. Tanaka, and M. Uchida, “Production of Electron Vortex Beams Carrying Large Orbital Angular Momentum Using Spiral Zone Plates”, *J. Electron Microsc.*, **61**, 171 (2012).
- [164] C. Chang and A. Sakdinawat, “Ultra-High Aspect Ratio High-Resolution Nanofabrication for Hard X-Ray Diffractive Optics”, *Nat. Commun.*, **5**, 4243 (2014).
- [165] J. Yu, Z. Bai, G. Zhu, C. Fu, Y. Li, S. Liu, C. Liao, and Y. Wang, “3D Nanoprinted Kinoform Spiral Zone Plates on Fiber Facets for High-Efficiency Focused Vortex Beam Generation”, *Opt. Express*, **28**, 38127 (2020).
- [166] K. J. Mitchell, S. Turtaev, M. J. Padgett, T. Čižmár, and D. B. Phillips, “High-Speed Spatial Control of the Intensity, Phase and Polarisation of Vector Beams Using a Digital Micro-Mirror Device”, *Opt. Express*, **24**, 29269 (2016).
- [167] 高橋 毅, “FFT法を用いるフレネル回折計算 ～サンプリング定理による考察～”, *光学*, **39**, 209 (2010).
- [168] D. Mas, J. Garcia, C. Ferreira, L. M. Bernardo, and F. Marinho, “Fast Algorithms for Free-Space Diffraction Patterns Calculation”, *Opt. Commun.*, **164**, 233 (1999).

-
- [169] J. Xiong and S.-T. Wu, “Planar Liquid Crystal Polarization Optics for Augmented Reality and Virtual Reality: From Fundamentals to Applications”, *eLight*, **1**, 3 (2021).
 - [170] N. V. Tabirian, D. Roberts, Z. Liao, E. Ouskova, J. Sigley, A. Tabirian, J. Slagle, M. McConney, and T. J. Bunning, “Size, Weight, and Power Breakthrough in Nonmechanical Beam and Line-of-Sight Steering with Geo-Phase Optics”, *Appl. Opt.*, **60**, G154 (2021).
 - [171] N. Tabiryan, D. Roberts, B. Kimball, D. Steeves, and T. J. Bunning, “Fourth Gen Optics - Planar Optics Revolutionized by LCD Technology”, *SID Symp. Dig. Tech. Pap.*, **51**, 1282 (2020).
 - [172] C. Yousefzadeh, A. Jamali, C. McGinty, and P. J. Bos, ““Achromatic Limits” of Pancharatnam Phase Lenses”, *Appl. Opt.*, **57**, 1151 (2018).
 - [173] N. V. Tabiryan, S. V. Serak, S. R. Nersisyan, D. E. Roberts, B. Y. Zeldovich, D. M. Steeves, and B. R. Kimball, “Broadband Waveplate Lenses”, *Opt. Express*, **24**, 7091 (2016).
 - [174] E.-L. Hsiang, Z. Yang, Q. Yang, P.-C. Lai, C.-L. Lin, and S.-T. Wu, “AR/VR Light Engines: Perspectives and Challenges”, *Adv. Opt. Photonics*, **14**, 783 (2022).
 - [175] N. Tabirian and P. Investigator, “Thin-Film Broadband Large Area Imaging System”, *NIAC Phase I Final Rep.*, **NNX15AL92G** (2016).
 - [176] Y. Chu, S. Firuzi, and S. Gong, “Controllable Liquid Crystal Diffractive Sail and Its Potential Applications”, *Acta Astronaut.*, **182**, 37 (2021).
 - [177] S. R. Nersisyan, N. V. Tabiryan, D. Mawet, and E. Serabyn, “Improving Vector Vortex Waveplates for High-Contrast Coronagraphy”, *Opt. Express*, **21**, 8205 (2013).
 - [178] P. F. McManamon, P. J. Bos, M. J. Escuti, J. Heikenfeld, S. Serati, H. Xie, and E. A. Watson, “A Review of Phased Array Steering for Narrow-Band Electrooptical Systems”, *Proc. IEEE*, **97**, 1078 (2009).
 - [179] M. V. Gorkunov, A. R. Geivandov, A. V. Mamonova, I. V. Simdyankin, I. V. Kasyanova, A. A. Ezhov, and V. V. Artemov, “Non-Mechanical Multiplexed Beam-Steering Elements Based on Double-Sided Liquid Crystal Metasurfaces”, *Photonics*, **9**, 986 (2022).
 - [180] M. Büchel, C. Minx, H. Menzel, and D. Johannsmann, “Command Layers with High Azimuthal Anisotropy: Static and Dynamic Behavior”, *Thin Solid Films*, **284**, 257 (1996).
 - [181] B. H. Clare, K. Efimenko, D. A. Fischer, J. Genzer, and N. L. Abbott, “Orientations of Liquid Crystals in Contact with Surfaces That Present Continuous Gradients of Chemical Functionality”, *Chem. Mater.*, **18**, 2357 (2006).
 - [182] A. D. Price and D. K. Schwartz, “Anchoring of a Nematic Liquid Crystal on a Wettability Gradient”, *Langmuir*, **22**, 9753 (2006).

- [183] Y.-F. Chung, M.-Z. Chen, S.-H. Yang, and S.-C. Jeng, "Tunable Surface Wettability of ZnO Nanoparticle Arrays for Controlling the Alignment of Liquid Crystals", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7**, 9619 (2015).
- [184] J.-W. Hu, S.-H. Yang, and S.-C. Jeng, "UV-Treated ZnO Films for Liquid Crystal Alignment", *RSC Adv.*, **6**, 52095 (2016).
- [185] H. Pae, Y. Choi, D.-W. Kim, and S.-D. Lee, "Pretilt Control of a Nematic Liquid Crystal on a Selectively Patterned Homeotropic Layer Over a Homogeneous Layer", *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **492**, 237/[601] (2008).
- [186] W.-W. Chen, J.-W. Pan, and S.-C. Jeng, "Polar Anchoring Properties of Photoalignment Polyimide Films", *Proc. Int. Disp. Work.*, **1**, 324 (2019).
- [187] D. W. Berreman, "Solid Surface Shape and the Alignment of an Adjacent Nematic Liquid Crystal", *Phys. Rev. Lett.*, **28**, 1683 (1972).
- [188] L. T. Creagh and A. R. Kmetz, "Mechanism of Surface Alignment in Nematic Liquid Crystals", *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **24**, 59 (1973).
- [189] T. Uchida, H. Watanabe, and M. Wada, "Molecular Arrangement of Nematic Liquid Crystals", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **11**, 1559 (1972).
- [190] T. Uchida, K. Ishikawa, and M. Wada, "Liquid Crystal Alignments and Surface Energy", *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **60**, 37 (1980).
- [191] P. S. Noonan, A. Shavit, B. R. Acharya, and D. K. Schwartz, "Mixed Alkylsilane Functionalized Surfaces for Simultaneous Wetting and Homeotropic Anchoring of Liquid Crystals", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **3**, 4374 (2011).
- [192] Y. Kitazaki and T. Hata, "Surface-Chemical Criteria for Optimum Adhesion", *J. Adhes.*, **4**, 123 (1972).
- [193] J. Li and S.-T. Wu, "Extended Cauchy Equations for the Refractive Indices of Liquid Crystals", *J. Appl. Phys.*, **95**, 896 (2004).
- [194] J. Li, C.-H. Wen, S. Gauza, R. Lu, and S.-T. Wu, "Refractive Indices of Liquid Crystals for Display Applications", *J. Disp. Technol.*, **1**, 51 (2005).
- [195] G. Shibuya, S. Yamano, H. Yoshida, and M. Ozaki, "Active Liquid-Crystal Deflector and Lens with Fresnel Structure," *Proc. SPIE., Emerging Liquid Crystal Technologies XII*, **10125**, 101250V (2017).

謝辞

最後に、本論文を締めくくるにあたり、終始御懇切な御指導と御鞭撻を賜り、また大学生活全般においても数多くの御助言を頂戴しました大阪大学の尾崎雅則教授に衷心より感謝の意と御礼の言葉を申し上げます。

本研究の遂行および論文の執筆にあたり、数多くの御厚意と御助力を頂き、直接の親身な御指導を賜りました大阪大学の吉田浩之講師に心より感謝の意と御礼の言葉を申し上げます。

同様に、本研究の遂行及び論文の執筆にあたり、御親切な御助力を頂き、数多くの御懇切な御指導と御鞭撻を賜りました大阪大学の森勇介教授に衷心より感謝の意と御礼の言葉を申し上げます。

また、本論文の執筆およびイノベーションデザインコースワークにおいて、数多くの御指導と御鞭撻を賜りました大阪大学の光井將一招聘教授、菰田卓哉特任教授、松波晴人特任教授、松行輝昌招聘教授、新藤一彦特任教授、およびパナソニック株式会社の松居真一氏に衷心より感謝の意と御礼の言葉を申し上げます。

大阪大学大学院工学研究科に在学中、御親切な御指導を賜りました片山光浩教授、片山竜二教授、小島一信教授、近藤正彦教授、廣瀬哲也教授、丸山美帆子教授、森伸也教授に衷心より感謝の意とお礼の言葉を申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、数々の御指導御助言、また大学生活全般においても数多くの御助言を頂戴しました大阪工業大学の藤井彰彦教授、大阪大学の久保等特任研究員、澁谷義一特任研究員、および Shai Vardeny 博士に衷心より感謝の意と御礼の言葉を申し上げます。

本研究の遂行にあたり多くの御協力を頂き、また研究生活を過ごす上で大変お世話になりました尾崎研究室秘書の松本光子氏、井上彩氏、株式会社エルシオの李薺里博士、シャープ株式会社の藪内湧太博士、LG ディスプレイ株式会社の趙成龍博士、ラムリサーチ株式会社の金宇鎮博士、株式会社タムロンの鷺野弦也博士、東京電力ホールディングス株式会社の石裏遼氏、株式会社村田製作所の村田将司氏、三菱商事株式会社の岩田悠人氏、株式会社ダイヘンの大泉朋久氏、ダイシン電機株式会社の坪井雄都氏、株式会社福井村田製作所の中山祐介氏、株式会社野村総合研究所の西川朋紘氏、株式会社ティエルブイの藤崎雅隆氏、日産自動車株式会社の桑原直氏、凸版印刷株式会社の正能拓馬氏、中山雄介氏、トヨタ自動車株式会社の西本江里氏、長谷川遼氏、シャープ株式会社の上野佳秋氏、レーザーテック株式会社の齋藤智樹氏、川崎重工株式会社の田淵大地氏、本田技研工業株式会

社の三橋將吾氏、エプソン株式会社の蓑輪裕氏、大阪大学大学院博士後期課程の仲嶋一真氏、博士前期課程の阿部健太郎氏、河原圭佑氏、瀬野知也氏、長崎秀斗氏、西健斗氏、三宅紹心氏、安木一希氏、上藤大和氏、大阪大学学部4年回生の武田知大、戸倉元輝氏、中瀬蒔優氏、長田雄貴氏、能浦奈々氏に衷心より感謝の意と御礼の言葉を申し上げます。

最後に、本研究は著者の学生生活および研究活動に理解と援助を惜しまず協力してくれた家族に支えられたものであることを記し、衷心より感謝の言葉を申し上げます。

研究業績

学術誌発表論文

1. **Yuji Tsukamoto**, Hiroyuki Yoshida, and Masanori Ozaki
“Generation of coaxial vortex beams with doubled topological charges using a stacked liquid crystal structure.”
Journal of Japanese Applied Physics, Vol. 60, Issue 120906, pp.120906-1 - 120906-6 (2021).
2. **Yuji Tsukamoto**, Hiroyuki Yoshida, and Masanori Ozaki
“Generation of a focused optical vortex beam using a liquid crystal spiral zone plate.”
Optics Express, Vol. 30, Issue 6, pp.8667-8675 (2022).
3. Kazuma Nakajima, **Yuji Tsukamoto**, Shogo Mitsuhashi, and Masanori Ozaki
“Frustrated lattice orientation of cholesteric blue phase II induced by micro-patterned surface alignment.”
Applied Physics Express, Vol. 15, Issue 071007, pp.071007-1 - 071007-4 (2022).
4. Hirokazu Kamifuji, Kazuma Nakajima, **Yuji Tsukamoto**, Masanori Ozaki, and Hirotugu Kikuchi
“Effect of rubbing symmetry on polarization distribution in ferroelectric nematic liquid crystal cells.”
Applied Physics Express, Vol. 16, Issue 071003, pp.071003-1 - 071003-4 (2023).
5. **Yuji Tsukamoto**, and Masanori Ozaki
“Liquid crystal micro-Fresnel zone plate with fine variable focusing properties.”
Optics Continuum, Vol. 2, Issue 9, pp 1889-1900 (2023).

国際学会発表

1. Hiroyuki Yoshida, Seong-Yong Cho, Yuto Tsuboi, **Yuji Tsukamoto**, and Masanori Ozaki
“Fundamentals and Applications of Liquid Crystal-Based, Polarization-Dependent Diffractive Optics.” Oral presentation, LCT2-1 (Invited talk).
26th International Display Workshops (IDW 2019)
Sapporo Convention Center, Sapporo, Japan, 27-29 November 2019
(Published Conference Proceedings: <https://doi.org/10.36463/idw.2019.0228>)
2. **Yuji Tsukamoto**, Hiroyuki Yoshida, and Masanori Ozaki
“Generation of Focused Vortex Beam by Liquid Crystal Spiral Zone Plate with Homeotropic and Planer Patterned Alignment Layer.” Poster presentation, P47.
The 19th Optics of Liquid Crystals Conference 2021 (OLC2021)
Online, 26 September - 1 November 2021,
3. **Yuji Tsukamoto**, Hiroyuki Yoshida, and Masanori Ozaki
“Coaxial Optical Vortex Generator based on Stacked Structure with Photo-aligned Nematic and Planar Cholesteric Liquid Crystal Layers.” Poster presentation, No. 6.
The 5th Core-to-Core Symposium Global Nanophononics 2022 (GNP2022)
Osaka International Convention Center, Osaka, Japan, 14-15 March 2022
4. Kazuma Nakajima, **Yuji Tsukamoto**, Shogo Mitsuhashi, and Masanori Ozaki
“Lattice Orientation of Cholesteric Blue Phase on Patterned Alignment Surface.”
Poster presentation, No. 5.
The 5th Core-to-Core Symposium Global Nanophononics 2022 (GNP2022),
Osaka International Convention Center, Osaka, Japan, 14-15 March 2022
5. **Yuji Tsukamoto**, Hiroyuki Yoshida, and Masanori Ozaki
“Generation of Focused Optical Vortex with High Efficiency using Liquid Crystal Spiral Zone Plate.” Oral presentation, FO-2.
The 28th International Liquid Crystal Conference (ILCC2022)
NOVA School of Science and Technology, Lisbon, Portugal, 24-29 July 2022
6. **Yuji Tsukamoto**, and Masanori Ozaki
“Proposal for Initial Parameters Decision Approach to Optimize Design of Multi-Twist Retarders.” Poster presentation, PF-313.
The 28th International Liquid Crystal Conference (ILCC2022)
NOVA School of Science and Technology, Lisbon, Portugal, 24-29 July 2022

7. Kazuma Nakajima, Ryo Hasegawa, Shogo Mitsuhashi, **Yuji Tsukamoto**, and Masanori Ozaki
“Lattice Orientation Characteristics of Cholesteric Blue Phase II on Micropatterned Surface Alignment.” Poster presentation, PC-099
The 28th International Liquid Crystal Conference (ILCC2022)
NOVA School of Science and Technology, Lisbon, Portugal, 24-29 July 2022
8. **Yuji Tsukamoto**, Yoshiaki Ueno, and Masanori Ozaki
“Fabrication of Liquid Crystal Grating Structure with Pretilt Angle Distribution Induced by UV Irradiation upon Vertical Alignment Polyimide Film.” Poster presentation, A7.
The 19th Optics of Liquid Crystals Conference 2021 Satellite Workshop (OLC2021 SWS2022)
Bankoku Shinryokan, Okinawa, Japan, 25-30 September 2022
9. Kazuma Nakajima, **Yuji Tsukamoto**, Shogo Mitsuhashi, and Masanori Ozaki
“Orientation Control of Cholesteric Blue Phase II using Micropatterned Surface Alignment.”
Poster presentation, A10.
The 19th Optics of Liquid Crystals Conference 2021 Satellite Workshop (OLC2021 SWS2022)
Bankoku Shinryokan, Okinawa, Japan, 25-30 September 2022
10. Masanori Ozaki, Kazuma Nakajima, Shogo Mitsuhashi, Seong-Yong Sho, and **Yuji Tsukamoto**
“Lattice orientation Control of Blue Phase Liquid Crystal on Photoaligned Surface.”
Oral presentation, I31 (Invited talk).
The 19th Optics of Liquid Crystals Conference 2021 Satellite Workshop (OLC2021 SWS2022)
Bankoku Shinryokan, Okinawa, Japan, 25-30 September 2022
11. Masanori Ozaki, Kazuma Nakajima, Shogo Mitsuhashi, and **Yuji Tsukamoto**
“Lattice Orientation of Photo-patterned Blue Phase Liquid Crystal.”
Oral presentation, Session 4A4a (Invited talk).
Photonics and Electromagnetics Research Symposium, also known as Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS2023)
Prague Congress Center, Prague, Czechia, 3-6 July 2023
12. **Yuji Tsukamoto**, and Masanori Ozaki
“Fine Control of Focal Length by Micro Fresnel Zone Plate Based on Liquid Crystal”
Oral presentation, O-17.
The 20th Optics of Liquid Crystals Conference 2023 (OLC2023)
Radisson Blu Hotel, Szczecin, Poland, 17-22 September 2023

13. Hirokazu Kamifuji, Kazuma Nakajima, **Yuji Tsukamoto**, Hirotsugu Kikuchi, and Masanori Ozaki
“Polarization Direction of Ferroelectric Nematic Liquid Crystals on the Surface of Alignment Films.” Oral presentation, I-10 (Invited talk).
The 20th Optics of Liquid Crystals Conference 2023 (OLC2023)
Radisson Blu Hotel, Szczecin, Poland, 17-22 September 2023
14. **Yuji Tsukamoto**, and Masanori Ozaki
“Focused Optical Vortex Generation using Liquid Crystal Spiral Zone Plate.” Oral presentation.
The 4th International Conference on Optics, Photonics, and Lasers (OPL-2023)
Sheraton Grande Hiroshima Hotel, Hiroshima, Japan, 4-6 December 2023
15. **Yuji Tsukamoto**, Yoshiaki Ueno, and Masanori Ozaki
“Optical Beam-Steering using Liquid Crystal Grating with Periodically Ultra-violet-light-treated Polyimide Film.” Oral presentation, 12907-11 (Invited talk).
SPIE Photonics West 2024, Emerging Liquid Crystal Technologies XIX
Moscone Center, San Francisco, California, United States, 27 January - 1 February 2024
16. Hirokazu Kamifuji, Kazuma Nakajima, Mahiro Nakase, **Yuji Tsukamoto**, Hirotsugu Kikuchi, and Masanori Ozaki
“Polarization Direction Configuration of Ferroelectric Nematic Liquid Crystals on the Surface of Alignment Films.” Poster presentation.
29th International Liquid Crystal Conference (ILCC 2024)
Windsor Convention & Expo Center, Rio de Janeiro, Brazil, 21-26 July 2024

国内学会発表

1. 塚本 脩仁、吉田 浩之、尾崎 雅則
「ねじれネマティック液晶型ベリー位相回折光学素子における回折効率のねじれ角依存性」
日本光学会年次学術講演会（ポスター発表、4pP3）
大阪府吹田市、大阪大学吹田キャンパス、2019年12月2日から5日
2. 塚本 脩仁、吉田 浩之、尾崎 雅則
「ねじれネマティック液晶積層型回折光学素子におけるベリー位相の線形性解析」
応用物理学会関西支部 2020 年度第 3 回講演会（ポスター発表、P-23）
大阪府池田市、産業技術総合研究所関西センター、2020 年 2 月 19 日
3. 塚本 脩仁、吉田 浩之、尾崎 雅則
「液晶積層構造による直交円偏光への異なるベリー位相付与」
日本液晶学会オンライン研究会（ポスター発表、PC07）
オンライン開催（ZOOM）、2020 年 10 月 29 日および 30 日
（若手研究者優秀ポスター賞）
4. 塚本 脩仁、吉田 浩之、尾崎 雅則
「液晶積層構造を用いた円偏光への異なる位相勾配付与によるベリー位相素子の新機能提案」
日本液晶学会液晶物理・物性フォーラム、分子配向エレクトロニクスフォーラム合同企画「学生・若手研究者ネットワーキングイベント」（口頭発表）
オンライン開催（ZOOM）、2020 年 12 月 16 日（招待講演）
5. 塚本 脩仁、吉田 浩之、尾崎 雅則
「液晶積層構造を用いた同軸光線上に異なるトポロジカルチャージを持つ光渦の生成」
第 69 回応用物理学会春季学術講演会（口頭発表、22p-D315-13）
神奈川県相模原市、青山学院大学相模原キャンパス
ハイブリッド開催（ZOOM）、2022 年 3 月 22 日から 26 日

6. 塚本 脩仁、上野 佳秋、中島 克也、尾崎 雅則
「垂直配向ポリイミド膜への紫外線照射による液晶プレチルト角の空間制御」
2022 年日本液晶学会討論会（ポスター発表、PE06）
オンライン開催（ZOOM）、2022 年 9 月 14 日 から 16 日
7. 塚本 脩仁、上野 佳秋、尾崎 雅則
「紫外線照射した垂直配向ポリイミド膜上の液晶相転移挙動」
2022 年日本液晶学会討論会（ポスター発表、PD09）
オンライン開催（ZOOM）、2022 年 9 月 14 日から 16 日
8. 仲嶋 一真、塚本 脩仁、三橋 将吾、尾崎 雅則
「フラストレート配向パターンを有する液晶セル内におけるコレステリックブルー相Ⅱの格子配向」
2022 年日本液晶学会討論会（口頭発表、1CO3）
オンライン開催（ZOOM）、2022 年 9 月 14 日から 16 日
9. 上野 佳秋、中島 克也、塚本 脩仁、尾崎 雅則
「紫外線照射による液晶の極角配向パターンニングと回折格子構造の作製」
第 83 回応用物理学会秋季学術講演会（ポスター発表、21p-P18-24）
宮城県仙台市、東北大学川内北キャンパス、及びオンライン（ZOOM）、2022 年 9 月 20 日から 23 日
10. 上野 佳秋、中島 克也、塚本 脩仁、尾崎 雅則
「紫外線照射による液晶プレチルト角の配向制御法」
応用物理学会関西支部 2022 年度 75 周年記念講演会（ポスター発表、P-20）
大阪府吹田市、大阪大学吹田キャンパス、2022 年 11 月 7 日
11. 塚本 脩仁、尾崎 雅則
「液晶マイクロフレネルゾーンプレートによる集光スポット位置の精密制御」
第 70 回応用物理学会春季学術講演会（口頭発表、17p-A201-13）
東京都千代田区、上智大学四ツ谷キャンパス、2023 年 3 月 15 日から 18 日

-
12. 上藤 大和、仲嶋 一真、塚本 脩仁、尾崎 雅則、菊池 裕嗣
「強誘電性ネマティック液晶の分子配向に及ぼすラビング対称性の効果」
第 70 回応用物理学会春季学術講演会（ポスター発表、17a-PA03-22）
東京都千代田区、上智大学四ツ谷キャンパス、2023 年 3 月 15 日から 18 日
13. 塚本 脩仁、尾崎 雅則
「親液疎液パターンニングを用いた液晶回折レンズによる焦点距離の精密制御」
応用物理学会関西支部 2023 年度 第 1 回講演会（ポスター発表、P-01）
大阪府吹田市、大阪大学吹田キャンパス、2023 年 6 月 5 日
(最優秀ポスター賞)
14. 上藤 大和、仲嶋 一真、塚本 脩仁、尾崎 雅則、菊池 裕嗣
「ラビング配向処理の異なるセルにおける強誘電性ネマティック液晶の分極分布」
応用物理学会関西支部 2023 年度 第 1 回講演会（ポスター発表、P-02）
大阪府吹田市、大阪大学吹田キャンパス、2023 年 6 月 5 日
15. 塚本 脩仁、尾崎 雅則
「紫外線表面改質によるプレチルト角制御を用いた液晶光波面制御デバイスの作製」
2023 年日本液晶学会討論会（口頭発表、3AO7）
東京都千代田区、東京理科大学神楽坂キャンパス、2023 年 9 月 11 日から 13 日
16. 塚本 脩仁、尾崎 雅則
「親液撥液パターンニングを用いた液晶ゾーンプレートの作製」
2023 年日本液晶学会討論会（ポスター発表、PA48）
東京都千代田区、東京理科大学神楽坂キャンパス、2023 年 9 月 11 日から 13 日
17. 上藤 大和、仲嶋 一真、塚本 脩仁、尾崎 雅則、菊池 裕嗣
「種々の配向処理により誘起される強誘電性ネマティック液晶の界面分極状態」
2023 年日本液晶学会討論会（ポスター発表、PA09）
東京都千代田区、東京理科大学神楽坂キャンパス、2023 年 9 月 11 日から 13 日

18. 上藤 大和、仲嶋 一真、塚本 脩仁、尾崎 雅則、菊池 裕嗣
「ラビングセルにおける強誘電性ネマティック液晶の分極分布」
2023 年日本液晶学会討論会（口頭発表、3CO9）
東京都千代田区、東京理科大学神楽坂キャンパス、2023 年 9 月 11 日から 13 日

19. 西 健斗、仲嶋 一真、塚本 脩仁、尾崎 雅則
「コレステリックブルー相 I の格子配列に及ぼす配向処理及び電界印加効果」
2023 年日本液晶学会討論会（ポスター発表、PA05）
東京都千代田区、東京理科大学神楽坂キャンパス、2023 年 9 月 11 日から 13 日

20. 瀬野 知也、塚本 脩仁、尾崎 雅則
「二光子励起光異性化反応を用いた液晶配向描画」
2023 年日本液晶学会討論会（ポスター発表、PA52）
東京都千代田区、東京理科大学神楽坂キャンパス、2023 年 9 月 11 日から 13 日

21. 上藤 大和、仲嶋 一真、塚本 脩仁、尾崎 雅則、菊池 裕嗣、
「種々の配向処理により誘起される強誘電性ネマティック液晶の界面分極状態」
第 84 回応用物理学会秋季学術講演会（口頭発表、20a-D902-5）
熊本県熊本市、熊本城ホール他 3 会場、2023 年 9 月 19 から 23 日

22. 上藤 大和、仲嶋 一真、中瀬 蒔優、塚本 脩仁、尾崎 雅則、菊池 裕嗣
「強誘電性ネマティック液晶の界面近傍における分極状態の配向処理効果」
応用物理学会関西支部 2023 年度 第 3 回講演会（ポスター発表、P-24）
大阪府池田市、国立研究開発法人 産業技術総合研究所 関西センター
2024 年 1 月 23 日

23. 上藤 大和、仲嶋 一真、中瀬 蒔優、塚本 脩仁、尾崎 雅則、菊池 裕嗣
「種々の配向処理がもたらす強誘電性ネマティック液晶の界面における分極配列」
2024 年第 71 回応用物理学会春季学術講演会（口頭発表、22a-P02-37）
東京都世田谷区、東京都市大学世田谷キャンパス
2024 年 3 月 21 日から 25 日

受賞歴

1. 2020 年日本液晶学会オンライン研究会
若手研究者優秀ポスター賞（虹彩賞）
2. 応用物理学会関西支部 2023 年度第 1 回講演会
ポスター賞（最優秀賞）
3. 一般社団法人生産技術振興協会
令和 5 年度下期海外論文発表奨励賞

採択

1. 国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）
科学技術イノベーション創出に向けた大学フェローシップ創設事業 大阪大学フェローシップ（ボトムアップ型）「社会と知の統合」を実現するイノベーション博士人材 第一期フェローシップ生
採択期間：2021 年 4 月から 2024 年 3 月まで
グラント番号：JPMJFS2125
2. 公益財団法人村田学術振興財団
2023 年度研究助成金（研究者海外派遣援助）
採択番号：M23 海自 030
3. 国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）
ACT-X リアル空間を強靱にするハードウェアの未来 2023 年度採択
研究課題：光波面をアクティブに制御可能な液晶フラットオブティックスの開発
採択期間：2023 年 10 月から 2026 年 3 月まで
グラント番号：JPMJAX23KF