

波長選択性向上による 小型の透過型回析素子の開発

関西学院大学 工学部 電気電子応用工学科
准教授 吉田 浩之

2025年3月13日

社会的位置づけ /研究分野の概要

【社会的位置づけ】

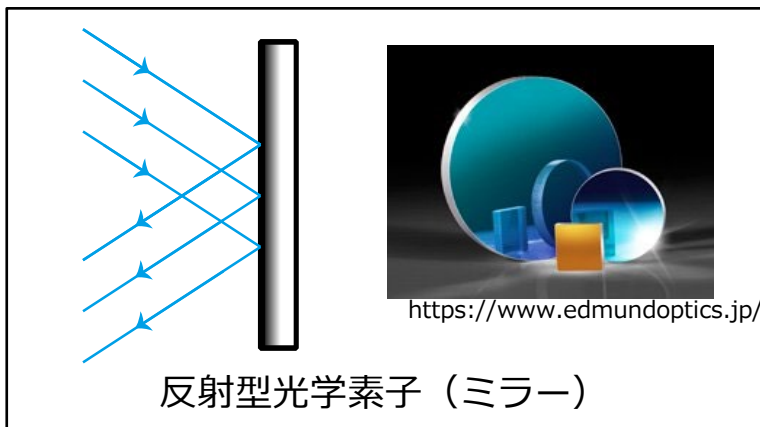
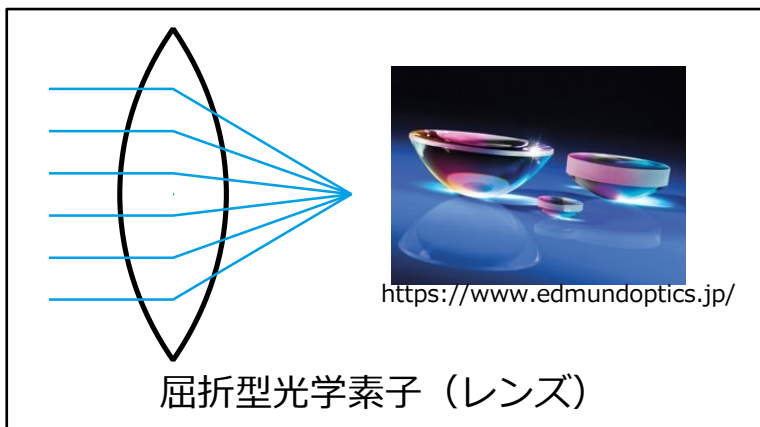
- AR/VR機器の普及が進む中，さらなる機器の小型/軽量化/低価格化への要求拡大.
- 従来のガラスやプラスチックを用いた光学素子のサイズ/重さ/価格の課題解決が重要.

【研究分野の概要】

- パターン配向液晶を用いた新たな回折光学素子の研究.
- 数ミクロンの薄膜状の光学素子が実現.
- 塗布プロセスにより大面積作製可能. 低コスト化に貢献.
- 一方，特に透過型素子の実現に際し，回折構造に由来する波長分散のため，色収差が顕著な点が課題.

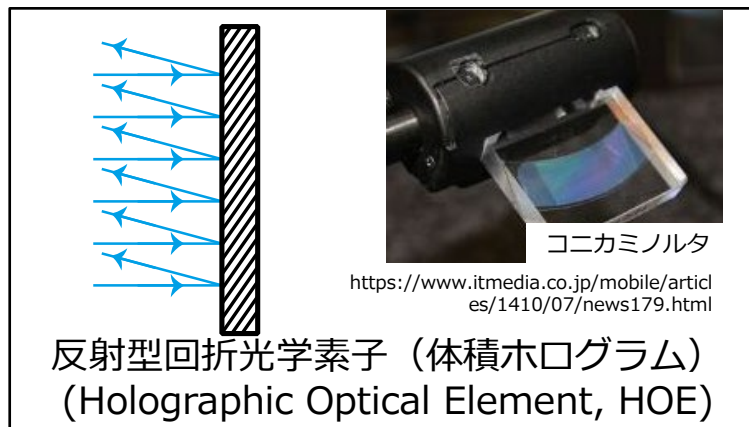
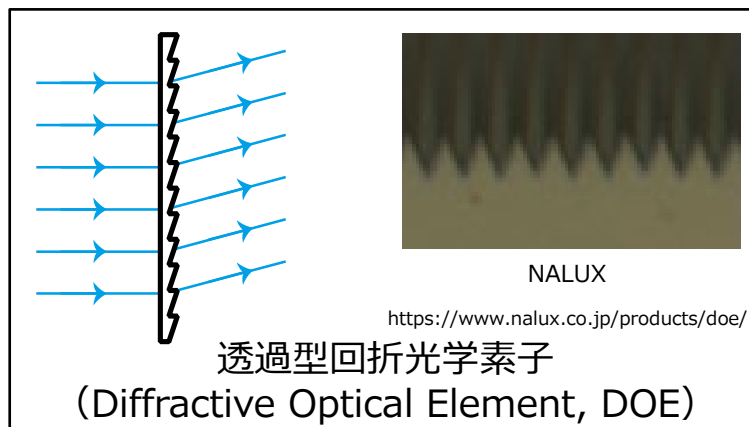
回折光学素子の特徴

(従来) レンズやミラー



- ・ 簡便に実現，扱いやすい
- ・ 大きい，厚い

(新) 回折光学素子



回折（波が拡がり、重なり合う現象）で光を制御

- ・ 設計によってさまざまな機能
- ・ 波長選択性をもつ
- ・ 薄い，軽量

・ 回折光学素子は小型・軽量な光学素子の実現が可能

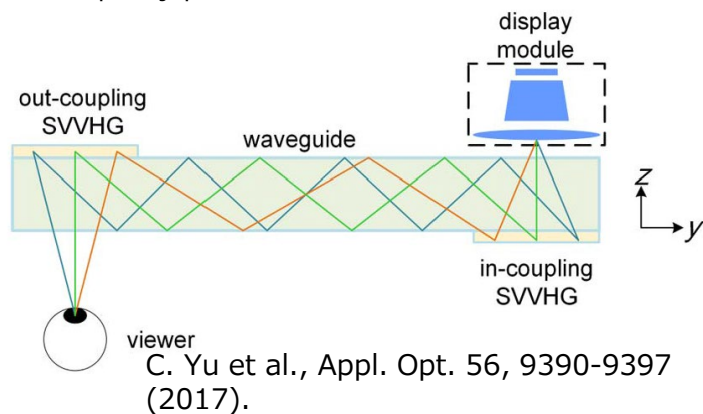
回折光学素子の応用例

● 導波路型ディスプレイ



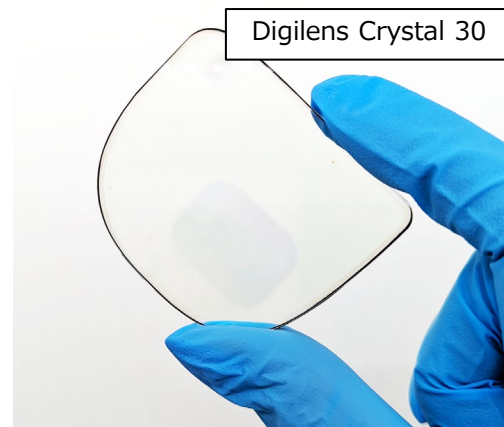
Microsoft HoloLens 2

<https://japan.cnet.com/article/35154097/2/>



MagicLeap 2

<https://japan.cnet.com/article/35184832/>

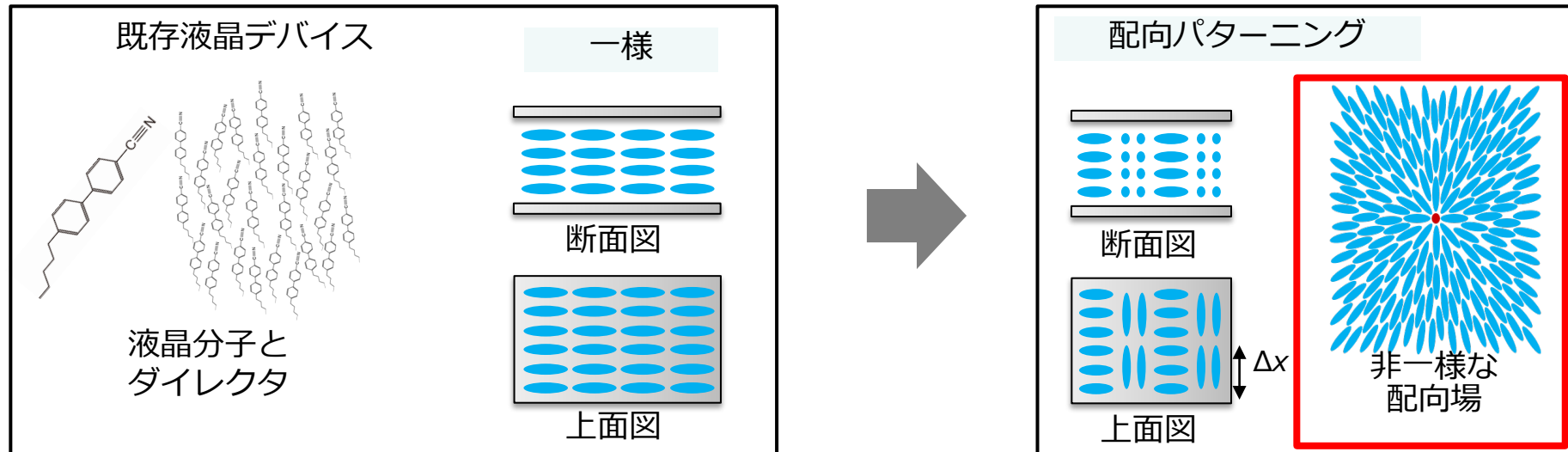


<https://www.digilens.com/optics/>

- メガネフレームに取り付けられたディスプレイの画像を高屈折率の導波路にて同行し、眼の前で取り出す
- 半透過型で光を大きく偏向する光結合器を用いる
- 複数の技術が存在するが、明確な勝者は決まっていない (ベンチャー多数)
 - 表面レリーフグレーティング (surface relief gratings)
 - 体積ホログラム (volume holograms)

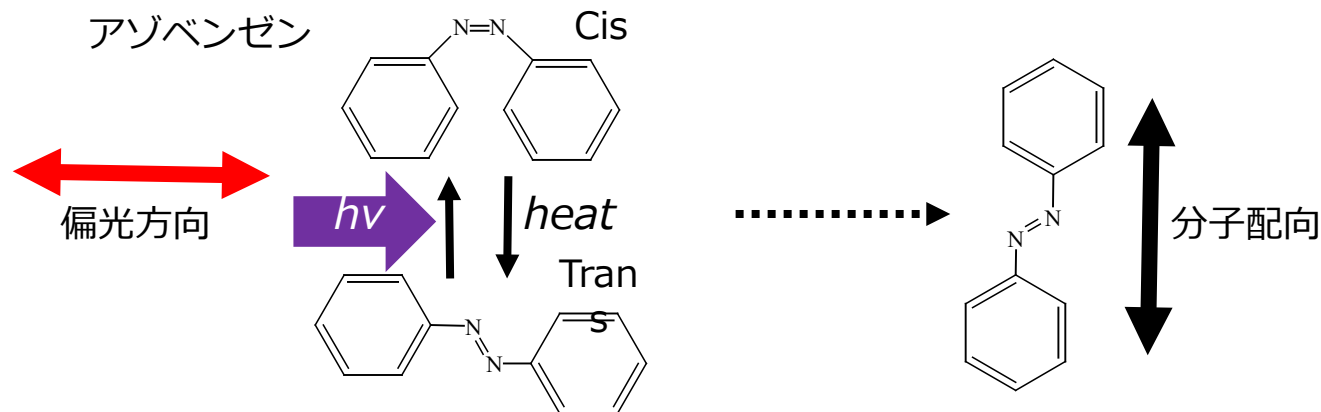
- 近年、回折光学素子はAR/VR応用に期待

パターン配向液晶 を用いた回折光学素子

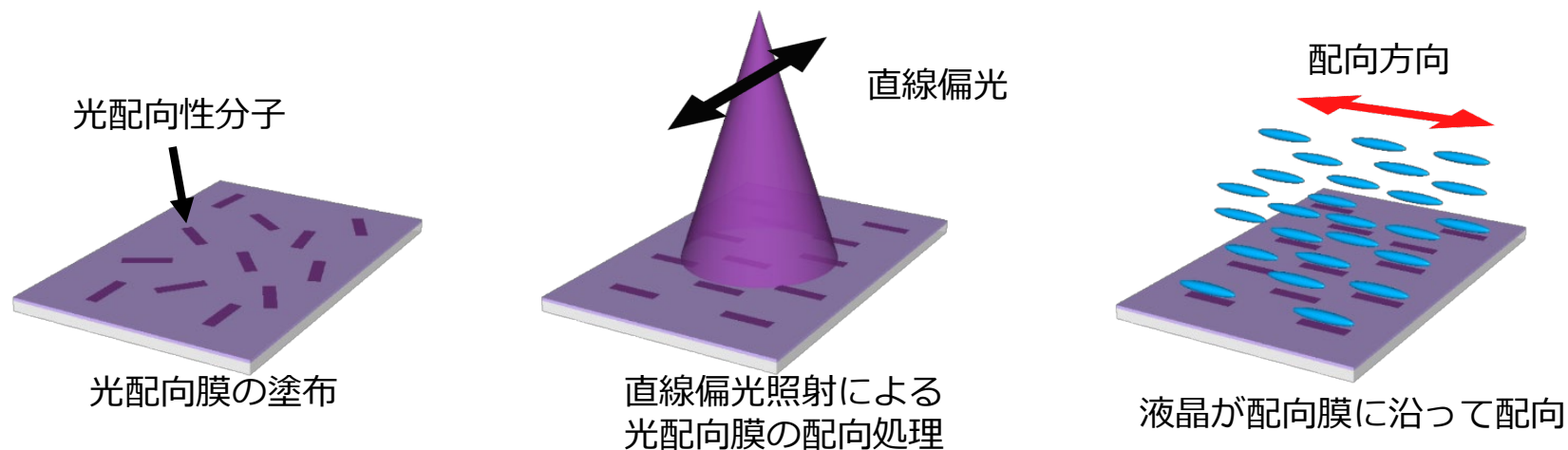


- 従来、液晶の配向は（比較的）一様
 - 配向場を非一様とすることによる液晶物性／光学的な機能創出に注目
 - 棒状液晶分子の配列方位の制御により，小型軽量・円偏光依存・高回折効率などを特徴とする回折光学素子群を実現
- 液晶の配列方位を基板上で制御，回折光学素子として動作

光配向法による パターン配光形成



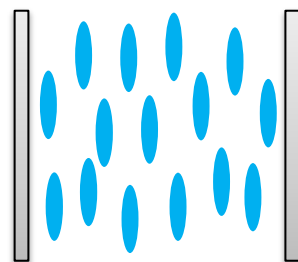
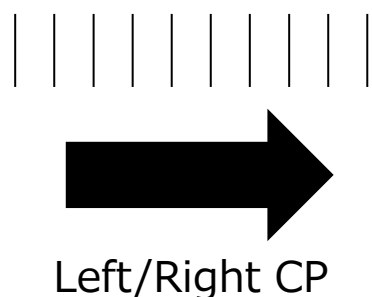
Weigert effect: 吸収異方性によって分子長軸が照射直線偏光に垂直配向



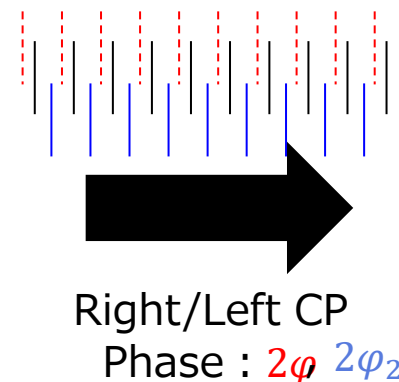
- 光配向法において偏光方向と照射領域の制御によって、配向をパターンニングすることで、回折光学素子を実現

Pancharatnam-Berry 位相： パターン配向液晶による回折光学素子

光がパターン配向された異方性媒質（ $\lambda/2$ 板）に入射すると、光軸の方位に異存した位相遅れが生じる



Half-wave plate : 角度 φ φ_2

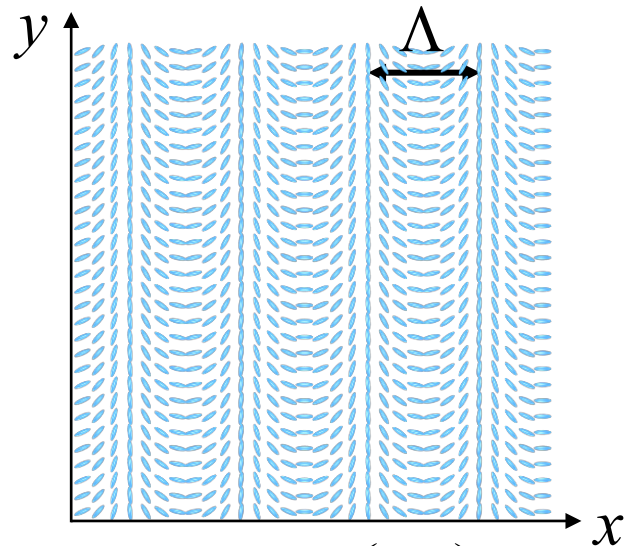


- 光位相の勾配は入射偏光に依存し、光軸方位（ φ ）の2倍（ 2φ ）に比例する
- 位相変調の効率のリタレーションが半波長（ $\lambda/2$ ）の時に最大となる
- リタレーションが半波長から外れると、偏光を反転させ位相変調を受ける成分と、偏光を維持したまま位相変調を受けない成分に分かれる
- 光軸方位の空間分布を形成することで、光波の回折が発生

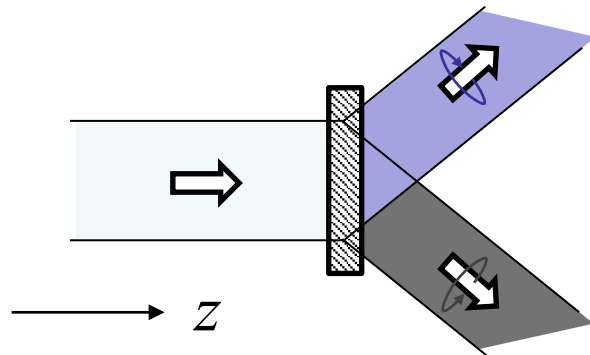
名称: Pancharatnam-Berry Optical Element (PBOE), Geometric Phase Element, Diffractive Waveplate (DW), Polarization Grating (PG)...

Proc. R. Soc. London A392, 45-57 (1984)., Proc. Indian Acad. Sci. 44, 247-262 (1956)., 光学, 49, 146 (2020).

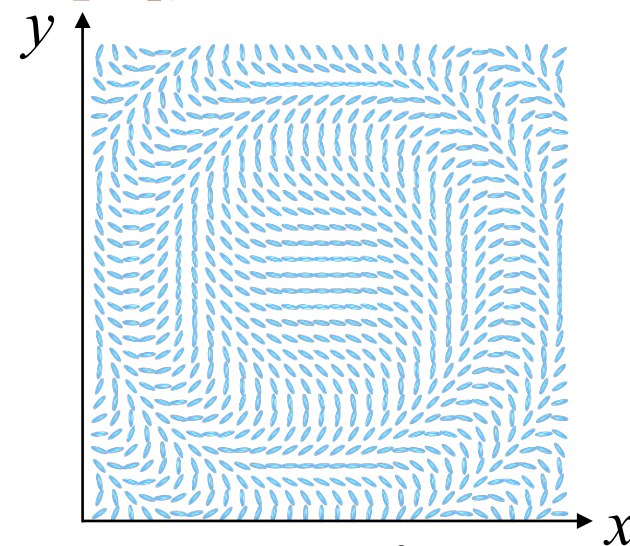
透過型PB 位相光学素子の 配向分布例



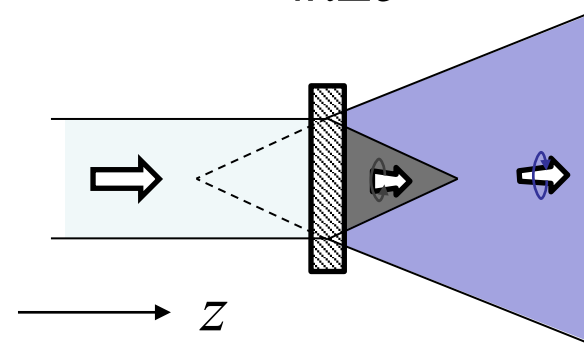
$$\theta_d = \sin^{-1} \left(\frac{\lambda}{n\Lambda} \right)$$



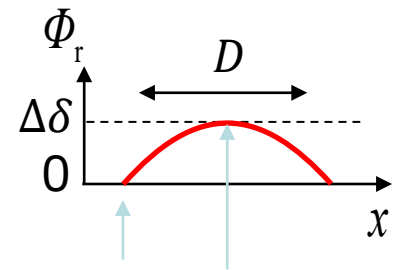
線形な配向分布：偏向素子



$$f = \frac{\pi D^2}{4\lambda\Delta\delta}$$



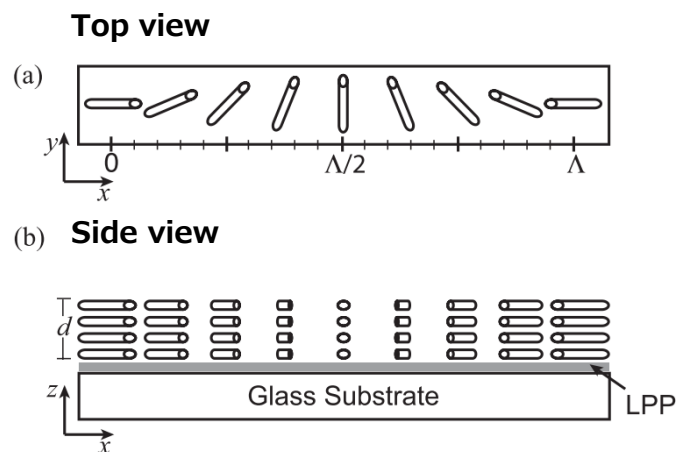
放物状の配向分布：レンズ素子



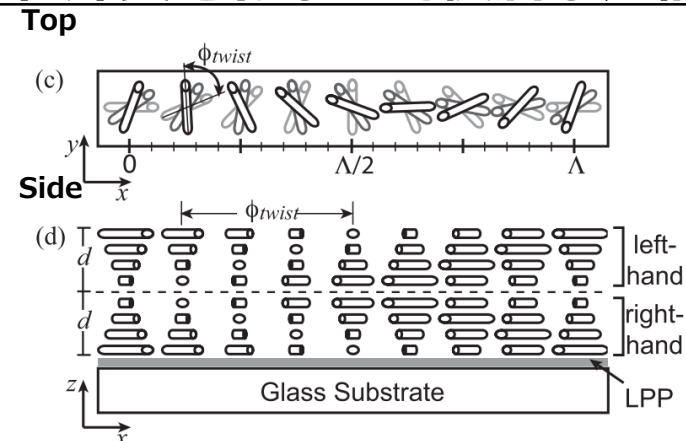
- 基板上の配列パターンの制御による，さまざまな機能付与

広帯域な PBレンズ

単純な一軸異方性



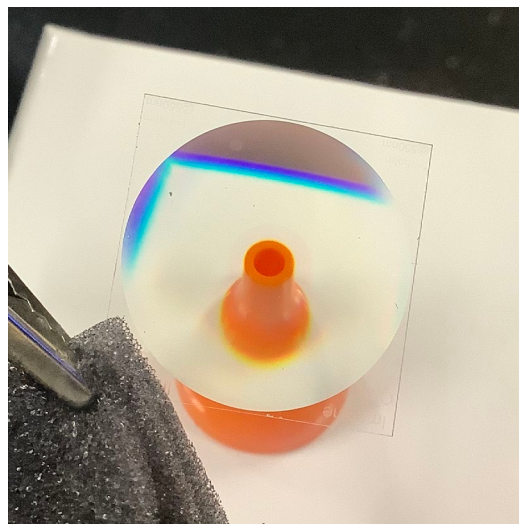
一軸異方性媒質をねじって積層した構造



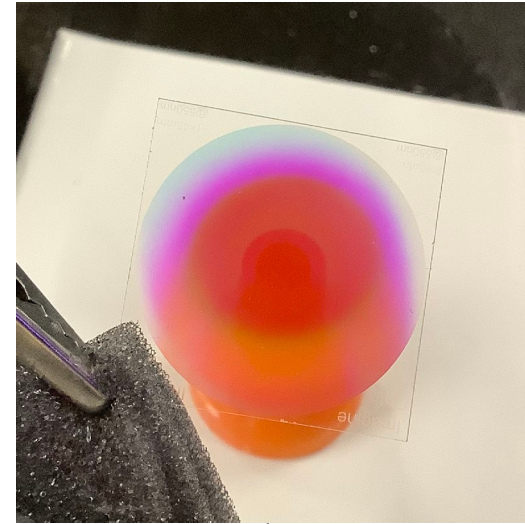
C. Oh, and M. J. Escuti, Opt. Lett. 33, 2287-2289 (2008).



PBレンズなし



PBレンズ+右円偏光



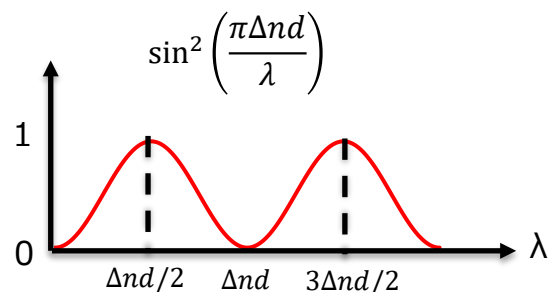
PBレンズ+左円偏光

- 液晶を使うことで広帯域（可視域）での回折が実現
- 入射偏光に依存して，正負の焦点が切り替わる性質

透過型PB回折素子の課題

従来技術による素子

回折効率の波長依存性



- PB回折素子は回折構造に由来して回折角の波長分散を示す
- また、回折効率は波長に対してなだらかな依存性を示す



透過した光は分散性によって分光（CDの裏面のよう）



液晶回折格子を透かして見た際の色分散の例

- 透過型回折素子は分散性が強いため、薄膜であるにもかかわらず、単独で用いるとイメージングの品質低下

新技術の特徴・

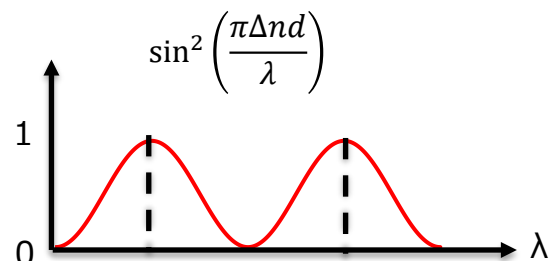
従来の回折光学素子技術との比較

- 回折効率が数10 nm程度の帯域幅においてのみ高く、その外では光を回折せずに透過。急峻な波長選択性をもつ回折光学素子構造を提案。
 - 本素子は以下の特徴をもつ。
 - 特定の波長の光を透過させながら回折し、設計に応じて偏向・集光などの回折機能を示す
 - 動作波長帯域以外では回折せず、光を透過する
 - 積層することで複数の波長でも動作する
 - 回折効率の高い波長選択性を利用し、複数積層することで、異なる色（波長）に対して最適化した素子を準備し、色収差を低減。
- 透過型でありながら、波長選択性の高い回折素子を提案することで、色収差改善などを可能

新技術の設計指針

従来技術による素子

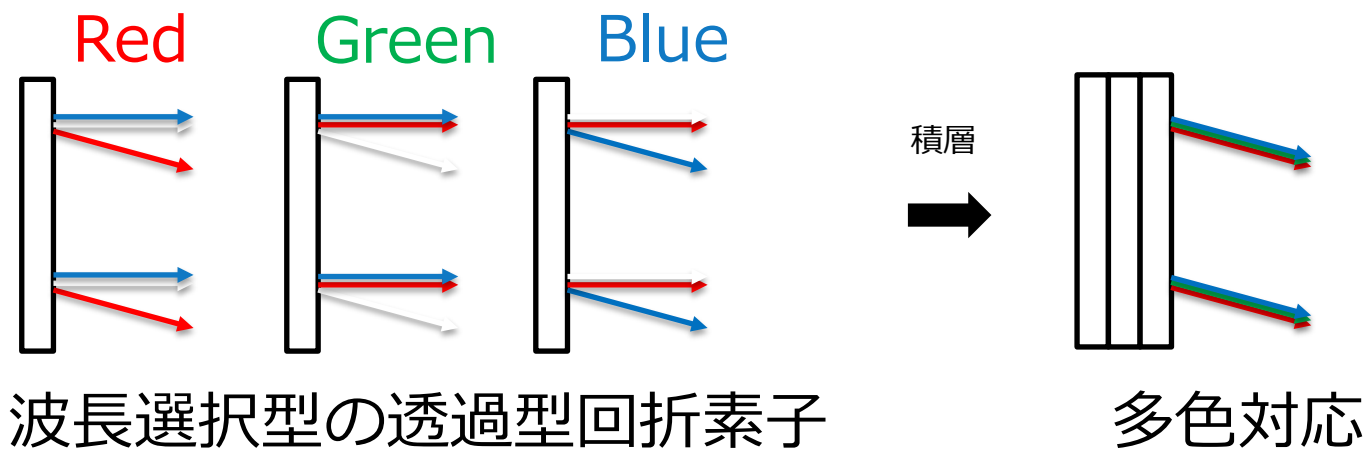
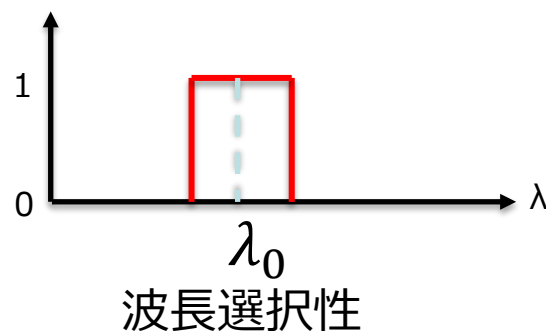
回折効率の波長依存性



- 一般に、回折効率 は波長に対してなだらかな依存性を示す
- PB回折素子は回折構造に由来して回折角の波長分散を示す

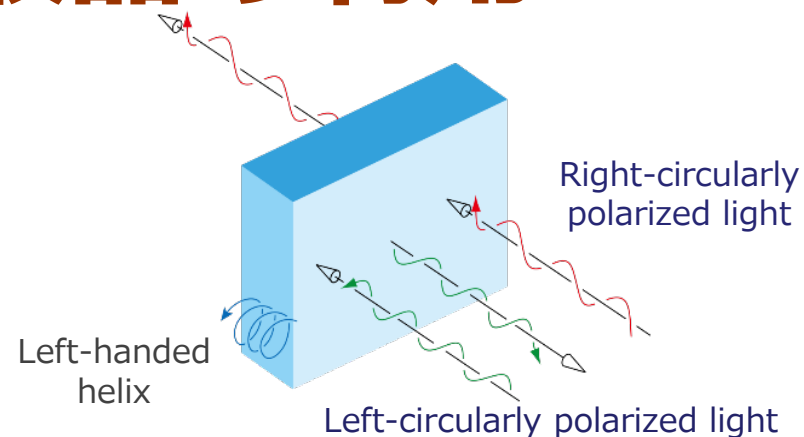
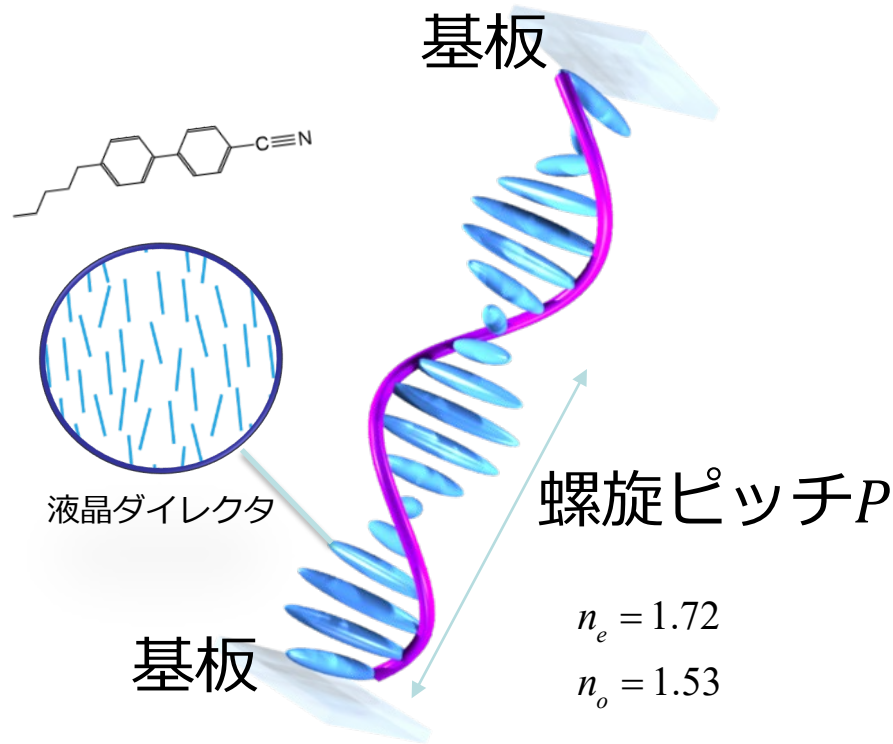
提案技術による素子

回折効率の波長依存性

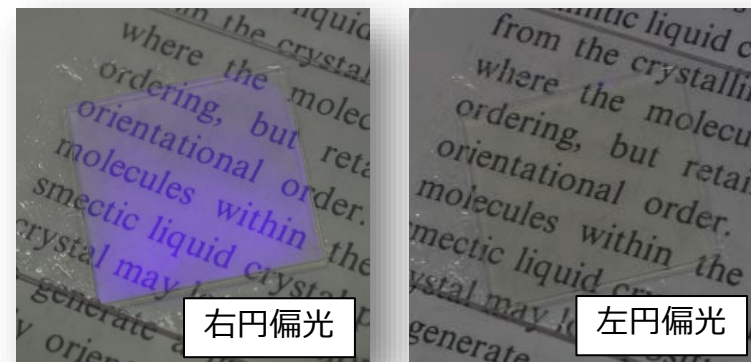


- 回折効率の波長依存性が急峻に変化する素子を提案
- 異なる波長の最適構造をもつ素子の積層による色分散抑制

コレステリック液晶の利用



Selective reflection(選択反射):
螺旋と同じ巻き方向の円偏光が $n_o p - n_e p$ の波長範囲においてブラッグ反射される



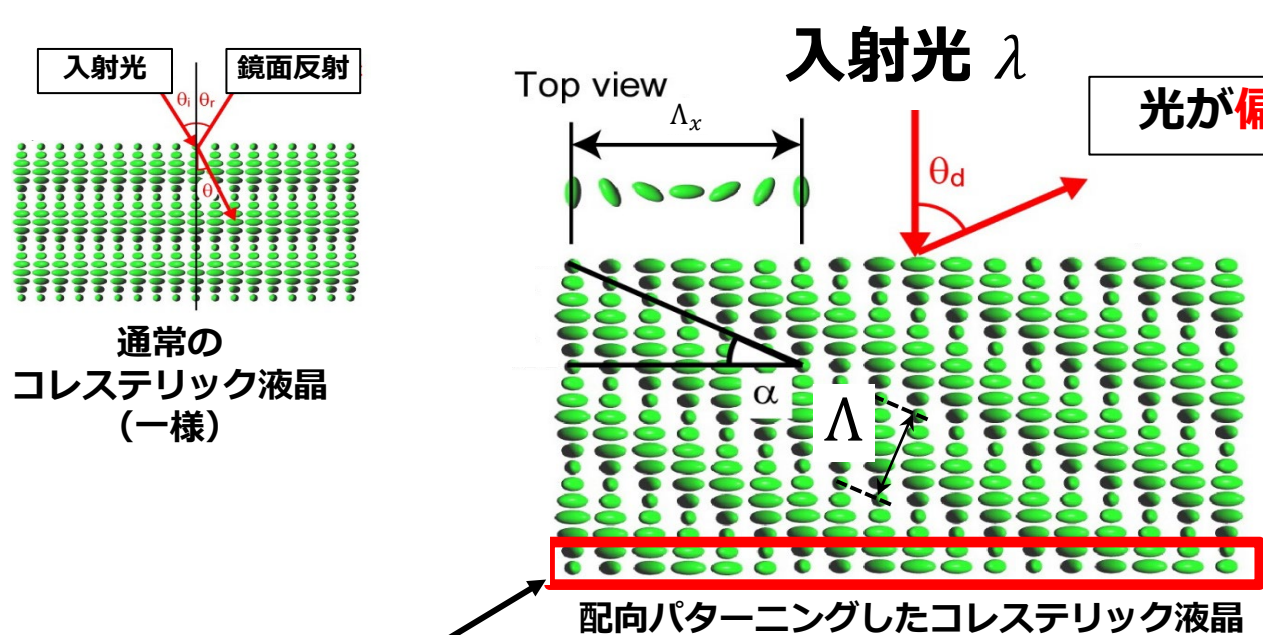
2枚のガラス基板に挟んだ
右巻き螺旋構造のコレステリック液晶の選択反射例

コレステリック液晶

- 分子の平均的な配向方向（ダイレクタ）が螺旋構造を形成する
- 屈折率：1.5~1.7程度
- 螺旋周期は数100 nm - μm
- 選択反射を示す

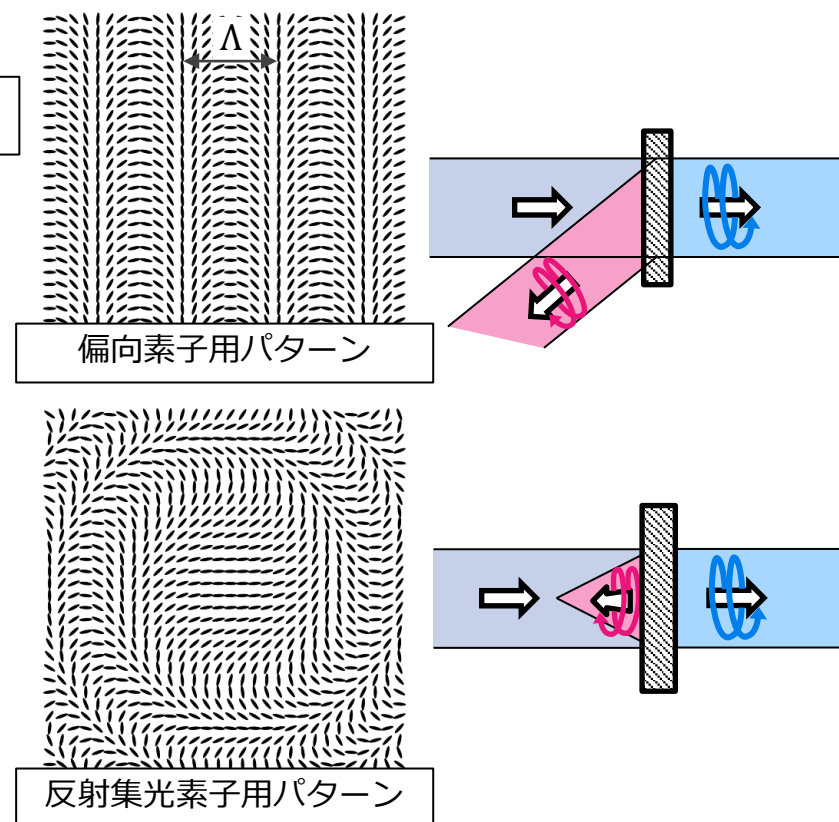
- 光をブラッグ反射する材料(コレステリック液晶)を利用

パターン配向した コレステリック液晶



コレステリック液晶の基板における配向をパターンニングすることを提案

回折角 $\sin \theta_d = \frac{\lambda}{n_1 \Lambda} \sin \alpha - \sin \theta_i$



J. Kobashi, H. Yoshida*, and M. Ozaki, *Nat. Photonics* 10, 389-392 (2016).
R. Ozaki et al., *OSA Continuum*, 2, 3354-3563 (2019).

- コレステリック液晶の配向方位設計による周期構造傾斜
- 反射型の回折光学素子 (ホログラフィック光学素子, HOE) 実現

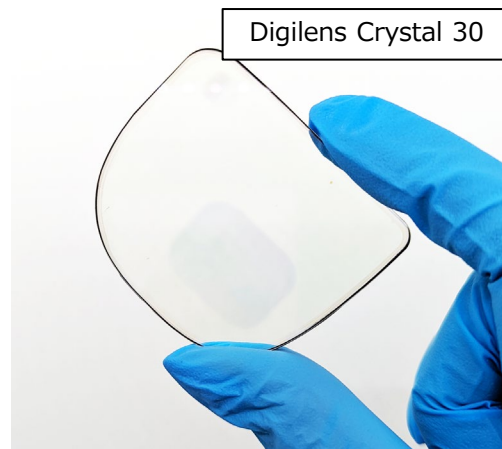
本技術の効果



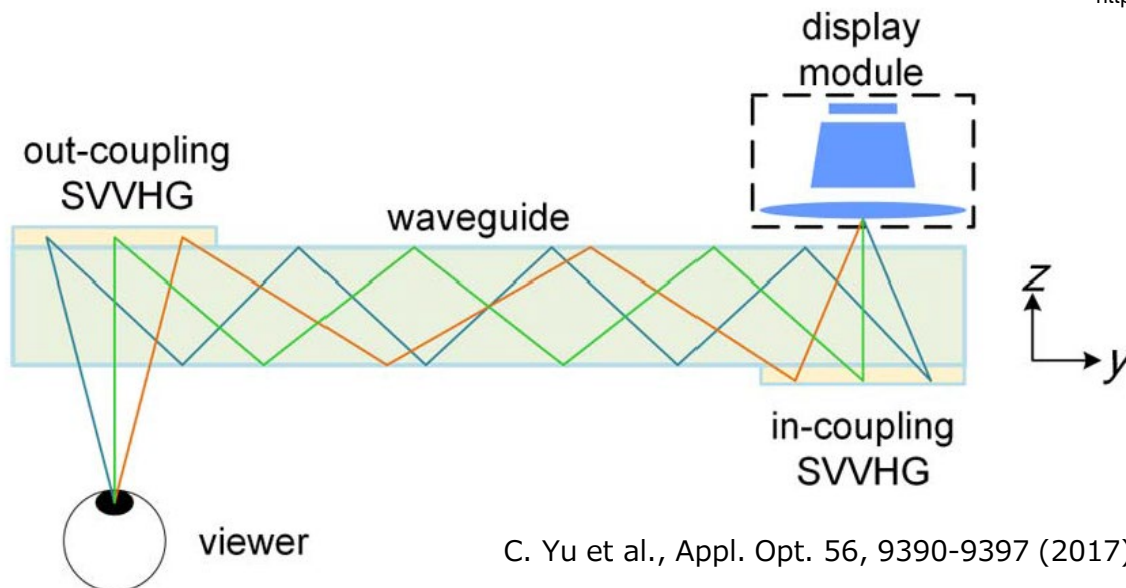
<https://japan.cnet.com/article/35154097/2/>



<https://japan.cnet.com/article/35184832/>



<https://www.digilens.com/optics/>

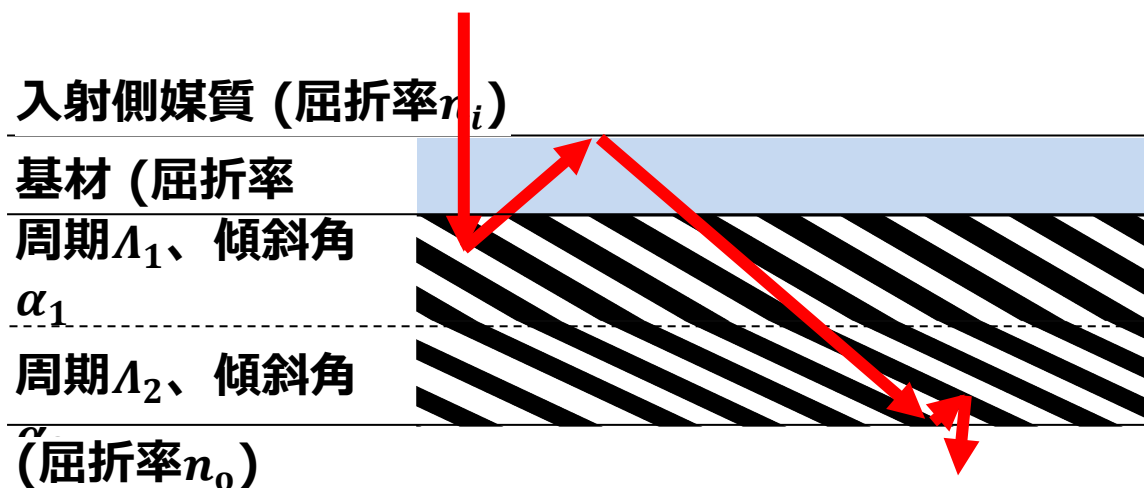


C. Yu et al., Appl. Opt. 56, 9390-9397 (2017).

- コレステリック液晶の傾斜角を大きくすることで，液晶膜からの反射光が基板／空気界面で全反射

提案構造

HOEの構造周期 Λ と傾斜角 α が膜の前・後面で変化する構造を提案



- HOE前面 の構造周期と傾斜角は、入射光を手前側界面において全反射するように設計されている
- HOE後面 の構造周期と傾斜角は、前面において全反射した光を外部に回折するように設計されている

提案構造の回折の式

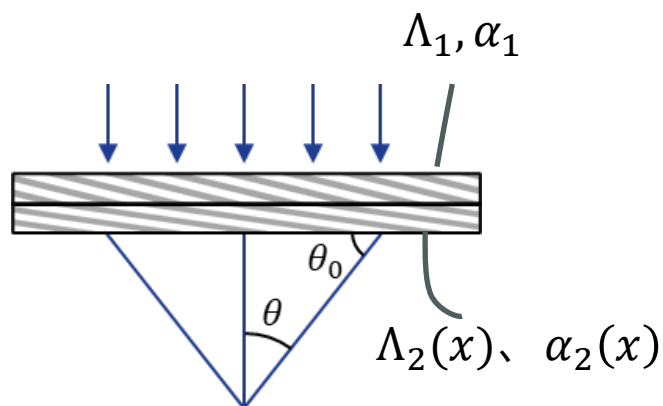
$$\left(\frac{\sin \alpha_2}{\Lambda_2} - \frac{\sin \alpha_1}{\Lambda_1} \right) = \frac{1}{\lambda} (n_0 \sin \theta_0 + n_i \sin \theta_i)$$

- 内部全反射などで、光が反射型HOEの前・後面 2 回回折
- コレステリック液晶のブラッグ回折による回折
- 特定の波長範囲でのみ生じることで、急峻な波長選択性を実現
- この条件を満たすような数値設計条件を明確化

波長選択型・ 透過型レンズ素子への拡張

前後面のHOEの傾斜角と構造周期の組み合わせにより、様々な透過回折機能を実現.

波長選択型レンズの設計例：



- 素子面内の位置毎に，出射角度を変調
 - 集光させるためには，左図のように徐々に出射角度 θ が変化して，一点で交わればよい
- 入射側の傾斜角を一定とした場合，出射側の傾斜角
 - ・ 構造周期を面内で変調すればよい
- 構造は電磁界シミュレーションにより最適化できる

- 光が反射型HOEの前・後面の2回、回折されるため、それぞれの構造（面内分布など）の組み合わせによってさまざまな回折機能を実現

想定される用途

- 波長選択的な回折を生じ、動作波長帯域外では光を透過する特性を活かした回折光学素子のVR/AR等の色収差補正用素子の実現.
- 特定の波長のみを回折させるセンサ等の光学素子への展開.
- HOEの素子設計の新しい考え方を適用することで、広い応用が可能.

実用化に向けた課題

- 所望の動作波長や回折機能に対して構造の最適化.
- 急峻な傾斜角をもつグレーティング構造による角度依存性の解消.
- 量産化を目指した急峻な構造傾斜角をもつ液晶HOEの作製方法の実現.
- 透過型集光などの機能実現を目指した液晶の微細配向パターン技術の実現.

企業への期待

- 光学デバイス・回折光学素子を開発中の企業には本発明による構造の利用可能性を検討していただきたい。
- 波長選択制・透過回折能を活かした活用のシーンについて広く意見交換をいただければ幸いです。

企業への貢献，PRポイント

- 本技術は透過型でありながら波長選択的な回折を生じるため，波長毎に構造を最適化することで，色収差の低減した高機能素子等の実現に貢献できると考える．
- 液晶回折光学素子の特性や，構造最適化にむけた技術指導等．

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 光学素子
- 出願番号 : 特願2024-151727
- 出願人 : 学校法人関西学院
- 発明者 : 吉田 浩之

お問い合わせ先

関西学院大学 研究推進社会連携機構

<https://www.kwansei.ac.jp/kenkyu>

TEL: 079-565-9052

FAX: 079-565-7910

Mail: industry-academia@kwansei.ac.jp