

令和元年5月29日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06289

研究課題名(和文) 液晶/ポリマー混合系における相分離構造の制御と動的な配光制御デバイスへの応用展開

研究課題名(英文) Control of the Polymer Aggregation Structure in Polymer Dispersed Liquid Crystals by using Anisotropically Diffused UV Light and its Application to the Light Distribution Control Devices

研究代表者

石鍋 隆宏 (ISHINABE, Takahro)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30361132

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、光の拡散分布を低電圧でかつ高速に制御する動的な配光制御の基盤技術の構築に向けて、液晶/モノマー混合系における光重合による高分子凝集構造の二次元分布を、重合に用いる紫外線光源の二次元分布と配光分布により制御する手法を提案した。高分子凝集構造は重合に伴って液晶中に生じる紫外線の照度分布に依存することを明らかにし、一方向拡散紫外線光源とマイクロレンズアレイを用いることで、高分子分散型液晶における高分子凝集構造とその二次元分布、および光拡散分布の制御に成功した。これらの成果を用いて、視野角を制御可能な液晶ディスプレイを実現し、ディスプレイの機能性と光利用効率の向上が可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、液晶/モノマー混合系において光重合により形成される高分子凝集構造を、紫外線光源の配光分布を用いて制御する新たな高分子構造制御技術を確立し、高分子分散型液晶の高分子凝集構造とその二次元分布を制御することで、動的な配光制御を実現した。本研究成果による紫外線の指向性と相分離メカニズムの解明は、精密な光制御に関する学術分野において重要な知見であり、複雑な光学系を用いず大面積での光制御を可能とすることから、スマートウィンドウ(電子調光窓)や光利用効率が高い低電力ディスプレイ、高い機能性を有する照明技術等、省エネルギーで人と環境に優しいエレクトロニクスの創出に貢献することができる。

研究成果の概要(英文)：We have established a method to control the polymer aggregation structure in polymer dispersed liquid crystals (PDLCs) by irradiating them with uni-directionally diffused UV light. We clarified that the layer structured PDLCs with alternating striped LCs/polymer pattern could be obtained by irradiating them with UV light in isotropic phase.

We also proposed a method to control 2 dimensional distribution of the polymer structure by using micro-lens. The micro-lens produced an uneven illuminance distribution of UV light in the LC-monomer mixture, and that the monomer was polymerized along the direction of UV light irradiation and formed high density layered structure.

The proposed PDLCs could electrically control the light diffusion distribution and had a high diffusion efficiency without polarization dependency in the haze value. We successfully achieved viewing angle controllable liquid crystal display with high light utilization efficiency.

研究分野：電子工学

キーワード：液晶 高分子分散型液晶 高分子凝集構造 光拡散分布 紫外線光源 光重合相分離 視野角制御ディスプレイ 液晶ディスプレイ

様式 F-19-2

1. 研究開始当初の背景

次世代の情報化社会の発展において、省電力で、かつ人に優しい照明技術の実現が待望されている。このためには、配光の制御技術の確立が重要であり、例えば、オフィスにおける外光と照明光の制御による省エネルギー化、自動車のヘッドライトや街灯などの配光制御による安全性の向上、均一性が高く、目に優しい照明装置の創出など、配光制御は極めて重要な役割を担っている。更に、これらの配光技術をディスプレイに応用することで、必要な場所に情報を的確に提供することが可能となり、このことはユビキタス情報化社会を進展させ、今後のライフスタイルを変革していく可能性を有しており、その実現に向けた基盤技術の確立が強く期待されている。

近年、動的に配光を制御する手法として、高分子中に液晶の小滴を分散させた高分子分散型液晶(Polymer dispersed liquid crystal, PDLC)が提案され、国内外において実用化に向けた研究が進められている。しかし、従来のPDLCは高分子の凝集構造の制御性が低く、光拡散分布を任意に制御することは困難であった。このことは、不要な方向に配光することを意味し、光利用効率の低下が問題となっていた。

このことから、PDLCの光拡散分布制御に向けた重要な課題として、PDLC内部における高分子の凝集構造の制御が挙げられるが、このために必要な基盤技術は未だ十分に構築されていなかった。

2. 研究の目的

本研究ではこれまでに、分子量や重合速度が異なる二種のモノマー材料の混合系において、紫外線を照射すると高分子化に伴って相分離が生じ、紫外線光源の二次元配置、配光分布、入射角度に応じた周期的な連続層構造が形成されることを明らかにしてきた。この周期構造は、凝集したポリマーによる集光効果により、紫外線の進行方向に高分子の分散構造が進展することで形成され、入射した光は、内部における多重回折により層構造に応じて異方的または等方的に光を散乱する。本構造による光散乱は特定の角度内で拡散光の強度が一定であることから不要な光放出を抑制し、目に優しい自然な配光が可能となる。

本研究では、この内部高分子構造の制御による光散乱制御技術を液晶/ポリマー混合系に拡張し、層構造の制御が可能な材料および重合条件を探索することにより、液晶中における新たな高分子凝集構造の制御技術の確立と、相分離メカニズムの解明を行うと共に散乱性液晶に応用することで、動的に光散乱の分布(配光)が制御可能なデバイスを実現することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では紫外線のパターン露光装置と、相分離構造および光拡散分布の評価システムを構築し、液晶/ポリマー混合系における相分離構造と配光特性について、精密にかつ効果的に評価する体制を整える。重合条件が相分離構造に与える影響の解析、紫外線光源の配光分布による相分離構造制御の確立とそのメカニズムの明確化、紫外線照度の二次元分布による相分離構造制御、および光拡散の動的な制御技術の確立と有効性の実証を通じて、液晶/モノマー混合系における相分離構造の制御技術を確立し、動的な配光制御デバイスの基板技術を学術的に体系化することを目的として以下のことを行う。

(1) 重合条件が相分離構造に及ぼす影響についての解析

相分離構造は、相分離過程における紫外線強度と温度に大きく依存する。0.01度の精度を有する現有の温度制御装置と偏光顕微鏡を用いて、相分離構造を観察するシステムを構築し、これら重合条件が相分離構造過程に与える影響を明確化し、相分離の最適条件を導出する。

(2) 相分離構造による光拡散制御

拡散角度特性測定装置(コノスコープ、オートロニック社製)を用いた光拡散分布の評価より、紫外線の配光分布と複合膜における高分子構造、および光拡散分布の関連性を明確化する。更に、電圧を印加させて、配光分布の変化を調べる。

(3) マイクロレンズによる紫外線光源の二次元分布および配光分布制御と相分離構造制御

フォトリソグラフィによりマイクロレンズアレイを作製し、レンズ拡散板と組み合わせることで紫外線の二次元分布および配光分布の制御システムを構築し、紫外線分布と相分離構造との関連性を明確化し、相分離メカニズムを解明する。

(4) 配光制御デバイスの試作と、光学特性の評価、有効性の実証

これまでに得られた設計条件に基づき、散乱性液晶を用いた配光制御デバイスを試作する。液晶ディスプレイと組み合わせることで視野角制御ディスプレイを構築し、拡散角度特性測定装置を用いた光拡散分布の評価より、試作したデバイスの有効性を確認する。

4. 研究成果

(1) 重合条件が相分離構造に及ぼす影響についての解析

以下の手順でサンプルを作製した。正の誘電率異方性を有するネマチック液晶 E-7 (Merck 社) および紫外線硬化性モノマー NOA65 (Norland Products 社) を用い、6:4 の割合で混合し、セル内に注入した。その後、図 1 に示すように中心波長 365 nm のコリメート露光型紫外線照射装置 (ジャテック社製)、およびレンズ拡散板 (Luminit 社製) を用いて、拡散分布を一方方向に制御した紫外線を照射した。紫外線の拡散角度は X 軸方向に 1 度、Y 軸方向に 60 度とした。紫外線の照度は 0.2 mW/cm^2 、照射時間を 1 時間とした。

紫外線照射時の温度の変化が PDLC 内部の高分子分布および光拡散分布に与える影響について評価した。作製温度を $30^\circ\text{C} \sim 90^\circ\text{C}$ の範囲で変化させて PDLC の作製を行い、内部の高分子構造および光拡散分布の異方性度の評価を行った結果、作製温度が 45°C よりも低い場合、不規則な高分子構造が形成され光は等方的に拡散した。一方、 45°C よりも高い場合、紫外線の拡散方向に沿った高分子層構造が形成され光は層構造に垂直な方位に異方的に散乱した。これは紫外線照射時の温度が低い場合、混合液が液晶相を示し紫外線を拡散したため紫外線の指向性が高分子構造に反映されなかったためである。一方、温度が高い場合、混合液は等方相を示し透明となることから、紫外線の拡散方向に沿った高分子層構造が形成された。

光拡散幅と拡散率については、温度の上昇に伴い低下した。これは、温度の上昇により液晶とモノマーの相溶性が高まり、十分な光重合相分離が発生しなかったためである。以上の結果より、混合材料の等方相温度で光重合を行うことで、紫外線の配光分布による高分子凝集構造の制御、および高い光拡散幅と拡散率を実現できることを明らかにした。

(2) 相分離構造による光拡散制御

高分子層構造を有した高分子分散型液晶 (Polymer Dispersed Liquid Crystal: PDLC) を作製し、電圧印加による光拡散分布の変化を評価した。液晶の厚さは $10 \mu\text{m}$ とした。0V および 50V の電圧を印加した場合の、光拡散分布および透過光の角度-輝度分布の測定結果を図 2 に示す。また、印加電圧-光拡散率特性の測定結果を図 3 に示す。図から、電圧により一方向性の光拡散と透明状態を制御可能であることを明らかにした。

(3) マイクロレンズによる紫外線光源の二次元分布および配光分布制御と相分離構造制御

紫外線照射により形成される高分子層構造は、重合により形成された高分子の凝集体による紫外線の集光効果によるものであり、混合液中に生じた紫外線照度の高い領域において、紫外線の進行方向に沿って高分子が伸張することで形成されることを明らかにした。従って、マイクロレンズを用いて紫外線照度の二次元分布を制御することで、任意の高分子層構造を形成することが可能である。フォトリソグラフ

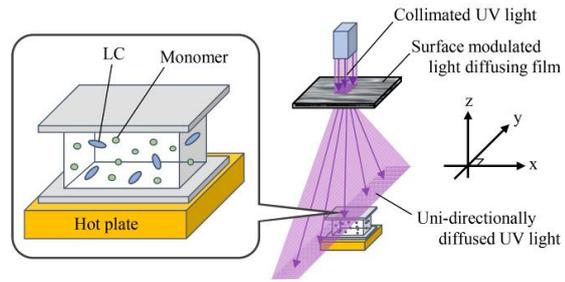


図 1 紫外線光源の配光分布による高分子構造制御型 PDLC の作製方法

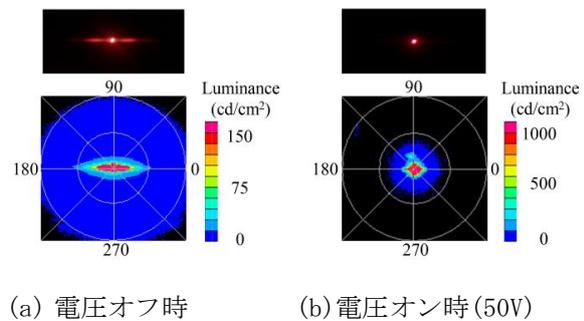


図 2 電圧印加による光拡散分布の変化

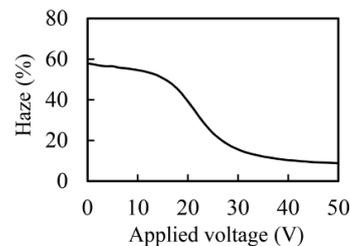


図 3 層構造型 PDLC の電圧-光拡散率特性

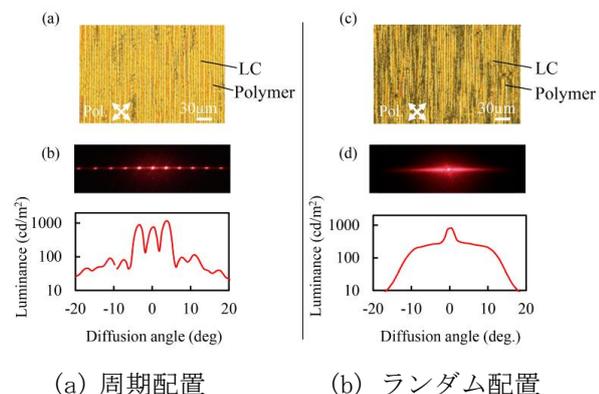


図 4 マイクロレンズによる高分子層構造の制御と光拡散分布の変化

イにより、周期的およびランダムな分布で配置されたマイクロレンズアレイを作製し、高分子層構造の形成を行った。形成したマイクロレンズの直径は $7.1\ \mu\text{m}$ 、高さは $1.4\ \mu\text{m}$ 、密度は $10000\ \text{個}/\text{mm}^2$ である。マイクロレンズアレイを用いて作製した PDLC の高分子分布および光拡散分布を図 4 に示す。周期的なレンズを用いた場合、 $10\ \mu\text{m}$ ピッチの高分子層構造が形成され、入射光は層構造に垂直な方位に回折することを確認した。一方、ランダムなレンズを用いた場合、非周期的な高分子層構造が形成され、光は特定の角度範囲に散乱透過した。以上の結果より、マイクロレンズの二次元分布を制御することで、高分子層構造の二次元分布を制御することが可能であり、紫外線光源の指向性と組み合わせることで、任意に光拡散分布を制御する手法を確立した。

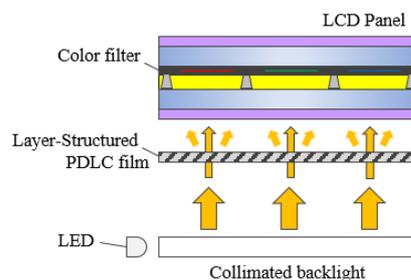
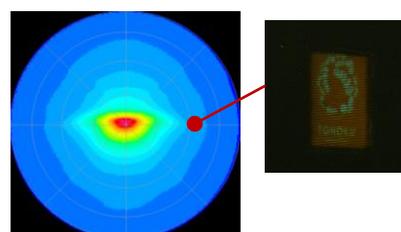


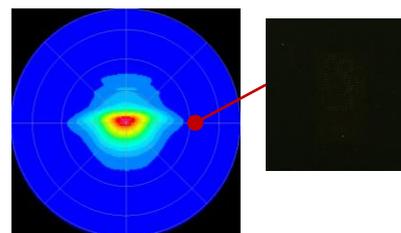
図 5 試作した視野角制御ディスプレイの構造

(4) 配光制御デバイスの試作と、光学特性の評価、有効性の実証

高分子層構造を有した PDLC を作製し、液晶ディスプレイおよびコリメートバックライトと組み合わせることで視野角制御ディスプレイを試作した。図 5 に試作した視野角制御ディスプレイの構造を、図 6 に電圧オフ時、およびオン時におけるディスプレイの角度-輝度特性の測定結果を示す。図から、本研究による PDLC を用いることで液晶ディスプレイの視野角が制御可能であることを確認した。ランダムな高分子層構造を有する従来の PDLC を用いた場合と比較して電圧オフ時の輝度は 2 倍以上であり、これは高分子層構造による拡散角度範囲の制御によるものである。



(a) 電圧オフ時



(b) 電圧オン時

図 6 視野角制御ディスプレイの角度-輝度特性

(5) 結論

本研究では、光拡散分布の動的な制御の実現に向けて、紫外線光源の配光分布による相分離構造制御手法を提案し、その作製条件と相分離メカニズムの明確化、紫外線照度の二次元分布による相分離構造制御、および光拡散の動的な制御素子の作製と有効性の実証を行った。この結果、液晶・モノマー混合液が等方相となる温度で紫外線重合を行うことで、紫外線の拡散分布に沿った高分子構造の形成と、光拡散幅および拡散率の向上が実現できることを明らかにした。また、フォトリソグラフィによりマイクロレンズアレイを作製し、その二次元配置を制御することで、高分子層構造の二次元配置を制御することが可能であり、膜厚が薄い PDLC の内部に高分子層構造を形成することで低電圧でかつ高速に光拡散分布が制御できることを明らかにした。コリメートバックライトと液晶ディスプレイと組み合わせることで視野角制御ディスプレイを作製し、電圧の印加により高い光利用効率で、視野角の制御が可能であることを示した。本研究の成果により、紫外線の配光分布による PDLC の高分子構造の制御手法を確立し、高分子構造形成メカニズムを明らかにすると共に、配光制御素子の大面积かつ容易な作製が可能であることを実証した。この成果は、液晶ディスプレイや照明の機能性および光利用効率の向上に寄与すると考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Takahiro Ishinabe, Yuya Horii, Yosei Shibata, Hideo Fujikake, “Light distribution control of layer-structured PDLC fabricated by using micro lens structure and anisotropically diffused UV light,” 査読有, Optics Express, Vol. 27, Issue 9, pp. 13416-13429 (2019).
<https://doi.org/10.1364/OE.27.013416>
- ② (Invited Paper) Yuya Horii, Yosei Shibata, Takahiro Ishinabe, Hideo Fujikake, “Polymer Distribution Control of Polymer-Dispersed Liquid Crystals by Uni-Directionally Diffused UV Irradiation Process,” 査読有, IEICE TRANSACTIONS on Electronics, Vol. E101-C, No. 11, pp. 857-862 (2018).
DOI: 10.1587/transele.E101.C.857

〔学会発表〕（計 8 件）

- ① Takahiro Ishinabe, Light Distribution Control by Layer-Structured PDLC Fabricated by using Anisotropically diffused UV light, Photonics & Electromagnetics Research Symposium, 2019 年.
- ② Takahiro Ishinabe, Diffused Light Control by Layer-Structured PDLC for Future Viewing Angle Controllable Display Applications, International Conference on Display Technology, 2019 年.
- ③ Yuya Horii, Formation Mechanism of Polymer Layered Structure in Polymer-Dispersed LCs with Anisotropic UV irradiation, International Display Workshops, 2018 年.
- ④ 堀井勇哉、紫外線の指向性照射で形成された PDLC の高分子構造分布の評価、2018 年日本液晶学会討論会、2018 年.
- ⑤ Takahiro Ishinabe, Structured PDLCs for Controlling LCD Viewing-Angle, Society for Information Display International Symposium, 2018 年.
- ⑥ Yuya Horii, Formation of Layered Polymer Structure of PDLC by Anisotropically Diffused UV Irradiation, International Display Workshops, 2017 年.
- ⑦ 堀井勇哉、指向性 UV 光源を用いた PDLC の高分子構造分布の制御、2017 年電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会、2017 年.
- ⑧ 堀井勇哉、配光可変型光拡散液晶フィルムの光拡散分布と内部構造の評価、第 64 回応用物理学会春季学術講演会、2017 年.

〔その他〕

ホームページ等

東北大学大学院工学研究科電子工学専攻藤掛・石鍋研究室ホームページ

<http://www.ecei.tohoku.ac.jp/fujikake/index.htm>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：藤掛 英夫

ローマ字氏名：(FUJIKAKE, hideo)

所属研究機関名：東北大学

部局名：大学院工学研究科

職名：教授

研究者番号：20643331

研究分担者氏名：柴田 陽生

ローマ字氏名：(SHIBATA, yosei)

所属研究機関名：東北大学

部局名：大学院工学研究科

職名：助教

研究者番号：70771880

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。