

# 湾曲固定液晶ディスプレイに向けたシリコン樹脂製配向制御 サンドイッチスペーサーの作製

神田竜哉、中谷誠和、藤掛英夫(フェロー)

あらまし 本論文では、固定曲率LCディスプレイにおいて、アライメントフィルムを使用せずに液晶(LC)のアライメントを制御し、剛体曲率基板間のスペーサーとして機能するアライメント制御サンドイッチスペーサーを提案した。このスペーサーはフレキシブルで、追加のLCアライメントフィルムを必要としない。スペーサーはポリシロキサン樹脂を用いた転写法により作製した。その結果、アライメント制御スペーサーと曲面ガラスを用いた曲面LCデバイスを作製し、このデバイスでLCアライメントを動かすことができる。ポリシロキサン表面により、液晶分子がポリマー側表面に対して垂直に配向していることがわかった。この装置は、ソリッドスティックスペーサーのない耐久性のある湾曲LCディスプレイを容易に破断させる。

キーワード：スペーサー、配向制御、PDMS、湾曲液晶ディスプレイ

## 1. Introduction

近年、社会は情報に溢れかえり、情報伝達手段の一つであるディスプレイの設置場所も多様化しており、フレキシブルディスプレイに注目が集まっている。現在、有機発光ダイオード(OLED)や液晶(LC)は、主にフレキシブルディスプレイに使用されている。LCディスプレイ(LCD)はOLEDよりも高い発光を示す。LCディスプレイは、有機EL<sup>[1]</sup>よりも大気中の水分や酸素による材料劣化が少なく、寿命が長いこと、デバイスの信頼性も高い。本論文では、高輝度、高耐久性、長寿命のLCDが様々な用途に適していると考えられているため、LCDに焦点を当てる。ただし、フレキシブル液晶の設置は、設置可能な表面3次元形状に関するものであるべきである。この制限の原因として、3つの問題がある。第一は外圧である。柔軟な液晶基板は、その性質上、衝撃に対しては強いが外圧に対しては弱く、基板のたわみや液晶層の厚みの変化により、無秩序なディスプレイを引き起こす可能性がある。したがって、フレキシブルLCD基板は、強い外圧を受ける設置面には適さない。次に曲率<sup>[2]</sup>時の応力。屈曲可能な液晶は、曲面に設置すると必ず曲がる。

そのため、内部スペーサーには常にストレスがかかり、スペーサーの劣化やLC層の厚みの変化が起こり、ディスプレイの乱れが生じる。したがって、現在のフレキシブルLCDは、長寿命が望まれる設置面には適さない。第三に、基質の種類が限定されている。従来のフレキシブルディスプレイスペーサーは以下の通りである：(1) 画素分離液晶スペーサー<sup>[3][4]</sup> (2) 溶接パターンスペーサー<sup>[5]</sup> (3) マイクロコンタクト印刷スペーサー<sup>[6]</sup> (4) フォトレジスターSU-8スペーサー<sup>[7]</sup> (5) ポリマー壁スペーサー<sup>[8]</sup>。(1)、(2)、(3)は棒状であるため、圧力に対して脆弱である。また、これらのスペーサーは、追加の光アライメントを必要とする。柔軟で弾力性のある基板を使用しなければならないが、耐水性、耐熱性、曲げ方向の制限などの問題が残る。したがって、図1に示すように、様々な場所に設置することは困難である。

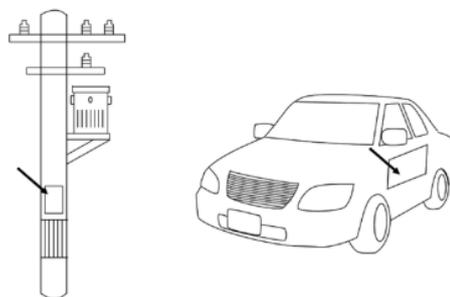


図1 環境抵抗、外圧抵抗、および3次元基板を必要とする取り付け面。

Received March 24, 2024; Revised June 4, 2024; Accepted June 30, 2024

†Department of Electronics, Graduate School of Engineering, Tohoku University (Sendai, Japan)

# Fabrication of Alignment-controlling Sandwiched Spacer with Polysiloxane Elastmer for Fixed-curvature Liquid Crystal Displays

Tatsuya Kanda<sup>†</sup>, Masakazu Nakatani<sup>†</sup> and Hideo Fujikake<sup>†</sup> (fellow)

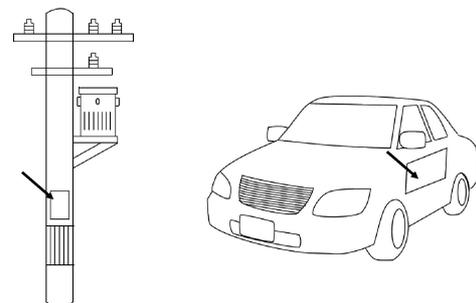
**Abstract** In this paper, we have proposed an alignment-controlling sandwiched spacer that controls the alignment of liquid crystals (LC) in fixed-curvature LC displays without using an alignment film and serves as a spacer between rigid curved substrates. This spacer is flexible and does not require additional LC alignment film. The spacer was fabricated by a transfer method using polysiloxane resin. As a result, we fabricated curved LC devices using alignment-controlling spacer and curved glass, and this device can move LC alignment. It was found that the polysiloxane surface causes the liquid crystal molecules to be oriented perpendicularly to the polymer side surface. This device lead to durable curved LC displays without solid stick spacers that break easily.

**Keywords:** spacer, alignment-control, PDMS, curved liquid crystal display.

## 1. Introduction

In recent years, society has been overflowing with information, and the installation locations of displays, one of the means of information transmission, have been diversifying, attracting attention to flexible displays. Currently, organic light emitting diode (OLED) and liquid crystal (LC) are mainly used for flexible displays. LC displays (LCDs) have higher luminescence than OLEDs. LC displays also have higher device reliability due to less material degradation from atmospheric moisture and oxygen, and generally longer life span than OLEDs [1]. This paper focuses on LCDs because LCDs with high brightness, high durability, and long life are considered suitable for a variety of applications. However, flexible LCDs installation should be regarding the surface three-dimensional geometry on which they can be installed. Three issues cause of this limitation. The first is external pressure. Flexible LCD substrates, by their nature, are strong against impact but weak against external pressure, and deflection of the substrate and changes in the thickness of the liquid crystal layer can cause disorderly displays. Therefore, flexible LCD substrates are not suitable for installation surfaces that are subject to strong external pressure. Second is stress

during curvature [2]. Flexible LCDs are always curved when installed on curved surfaces. Therefore, the internal spacer is constantly stressed, which causes deterioration of the spacer and changes in the thickness of the LC layer, resulting in display disturbances. Thus, current flexible LCDs are not suitable for installation surfaces where long life is desired. Third, the substrate type is limited. Conventional flexible display spacers are as follows: (1) Pixel isolated liquid crystal spacer.<sup>[3][4]</sup> (2) Sold and adhesive patterned spacer.<sup>[5]</sup> (3) Microcontact printing spacer<sup>[6]</sup>. (4) Photoresister SU-8 spacer<sup>[7]</sup>. (5) Polymer walls spacer<sup>[8]</sup>. (1), (2), and (3) are rod-type and therefore vulnerable to pressure. Also, these spacers require additional photoalignment. Flexible and resilient substrates must be used, and problems with water resistance, heat resistance, and bending direction limitations remain. Therefore, as shown in Fig. 1, installation in various locations is difficult.



**Fig. 1** Installation surfaces required environmental resistance, external pressure resistance and three-dimensional substrate.

Received March 24, 2024; Revised June 4, 2024; Accepted June 30, 2024

<sup>†</sup>Department of Electronics, Graduate School of Engineering, Tohoku University  
(Sendai, Japan)

本論文では、剛体曲面基板を用いた固定曲率LCDを考案した。固定曲率LCDとは、ガラスや強化プラスチックのような任意の三次元基板を、ディスプレイが設置された面に合わせて任意の形状に変形させたディスプレイのことである。固定曲率 LCD の製造により、ディスプレイを適応させ、あらゆる環境や用途で使うことができる。しかし、この方法では曲面基板を用いて最初からディスプレイを作製するため、従来の方法ではスペーサーを形成できなかったり、アライメントを装着できなかったりした。そこで、アライメント制御型サンドイッチスペーサーを開発した。この新しいスペーサーを曲面基板と組み合わせることで、アライメント膜を使用せずにLCのアライメントを制御することができる。アライメント制御サンドイッチスペーサーは、穴のあいたシート状のスペーサーであり、その柔軟性と弾力性により、曲面に設置し、LC層の厚さを維持することができる。本論文では、アライメント制御サンドイッチスペーサーを提案し、作製したデバイスのLCアライメントの基本動作を評価した。

## 2. アライメント制御サンドイッチスペーサーの構造

本節では、提案するアライメント制御サンドイッチスペーサーの構造について述べる。固定曲率 LCD の構造を図 2 に示す。従来のスペーサーは、使用する基板上に直接形成される。一方、アライメント制御可能なサンドイッチスペーサーは、作製後に使用する曲面基板上にサンドイッチされている。図3に示すように、アライメントを制御するサンドイッチスペーサーは、LC層を固定するために格子状のバルクヘッド構造を持つ。

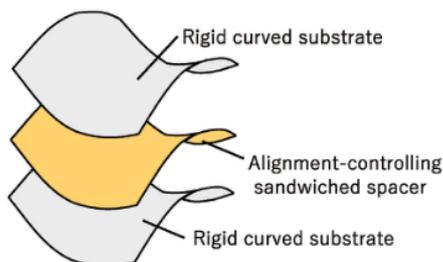


図2 固定キュベーション型液晶の構造。

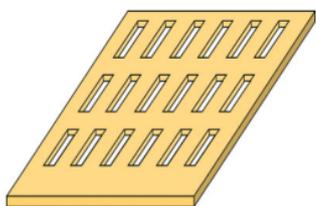


Fig. 3 Structure of alignment-controlling sandwiched spacer.

また、フィルムを作ることで、LC層の厚さを維持することができる。さらに、アライメントを制御するサンドイッチスペーサー<sup>[9]</sup>の材料特性に基づいて、アンカリングなどの表面アライメントを行うことで、LCアライメントを制御する。

## 3. アライメント制御サンドイッチスペーサーの作製

アライメント制御のサンドイッチスペーサーは、曲面に追従するために柔軟で伸縮可能でなければならず、ディスプレイ基板上にサンドイッチするには剥離可能な材料でなければならない。これらの条件を満たす材料として、ポリジメチルシロキサン(PDMS)を用いた<sup>[10]</sup>。LCは疎水性物質と垂直に配向することが知られている。PDMSはLCに対する濡れ性が低いため、LCはPDMSに対して垂直に整列することが期待される。

アライメント制御サンドイッチスペーサーを作製し、アライメントと電界駆動を確認した。アライメント制御可能なサンドイッチスペーサーは、金型を用いた転写法により作製した。金型の構造を図4に示す。アライメント制御サンドイッチスペーサーの作製プロセスを図5に示す。まず、PDMSの剥離を促進するために、フルオロポリマーであるCytoc(CL-809A、AGC)を金型に塗布した。次に、PDMSを金型に落下させ、その上にガラス基板を押し付けた。金型を加熱(80°C、1時間)してPDMSを硬化させ、真空にして気泡を除去した。最後に、カビを除去した。

作製したアライメント制御サンドイッチスペーサーの形状を共焦点レーザー走査型顕微鏡で確認した。

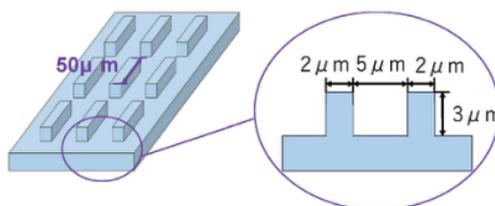


図4 金型の構造

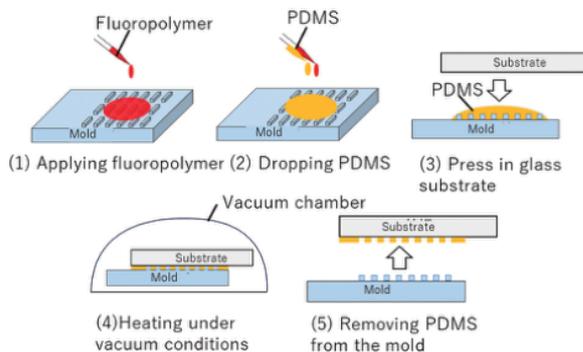


図5 アライメント制御サンドイッチスペーサーの作製プロセス

In this paper, we devised a fixed-curvature LCD using a rigid curved substrate. A fixed-curvature LCD is a display in which an arbitrary three-dimensional substrate, such as glass or reinforced plastic is deformed into an arbitrary shape to match the surface on which the display is installed. The production of fixed-curvature LCDs allows displays to be adapted and used in any environment or application. However, since this method uses a curved substrate to fabricate the display from the beginning, spacer could not be formed or alignment could not be attached using conventional methods. Therefore, we developed alignment-controlling sandwiched spacer. This new spacer when combined with curved substrates, can control LC alignment without using an alignment films. The alignment-controlling sandwich spacer is a sheet-shaped spacer with holes, and its flexibility and elasticity allow it to be installed on curved surfaces and maintain the thickness of the LC layer. In this paper, we proposed the alignment-controlling sandwiched spacer and evaluated the basic operation of LC alignment of the fabricated device.

## 2. Structure of Alignment-controlling Sandwiched Spacer

In this section, we describe the structure of our proposed alignment-controlling sandwiched spacer. The structure of a fixed-curvature LCD is shown in Fig. 2. Conventional spacers are formed directly on the substrate to be used. On the other hand, alignment-controlling sandwiched spacer is sandwiched on the curved substrate to be used after fabrication. As shown in Fig. 3, the alignment-controlling sandwiched spacer has a lattice-like bulkhead structure to secure the LC

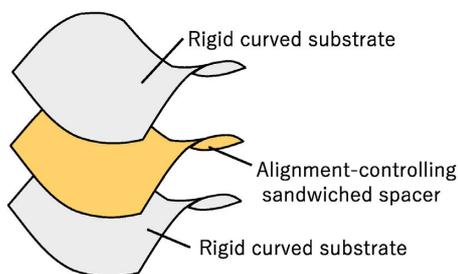


Fig. 2 Structure of fixed-curvature LCDs.

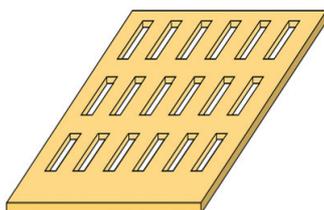


Fig. 3 Structure of alignment-controlling sandwiched spacer.

layer. In addition, by making a film, the thickness of the LC layer can be maintained. Furthermore, the LC alignment is controlled by using surface alignment such as anchoring based on the material characteristics of the alignment-controlling sandwiched spacer<sup>[9]</sup>.

## 3. Fabrication of Alignment-controlling Sandwiched Spacer

Alignment-controlling sandwiched spacer must be flexible and stretchable to follow curved surfaces, and must be a peelable material to be sandwiched onto display substrates. Polydimethylsiloxane (PDMS) was used as a material that satisfies these requirements<sup>[10]</sup>. LCs are known to align perpendicularly with hydrophobic materials. Since PDMS has poor wettability to LCs, LCs are expected to align perpendicularly to PDMS.

Alignment-controlling sandwiched spacer was fabricated to confirm alignment and electric field drive. The alignment-controlling sandwiched spacer was fabricated by transfer method using a mold. The structure of the mold is shown in Fig. 4. The fabrication process of alignment-controlling sandwiched spacer is shown in Fig. 5. First, a fluoropolymer, Cytop (CLT-809A, AGC), was applied to the mold to facilitate peeling of PDMS. Next, PDMS was dropped onto the mold and a glass substrate was pressed onto it. The mold was heated (80°C, 1 hour) to cure the PDMS, and then vacuumed to remove air bubbles. Finally, the mold was removed.

The shape of the fabricated alignment-controlling sandwiched spacer was confirmed by a confocal laser

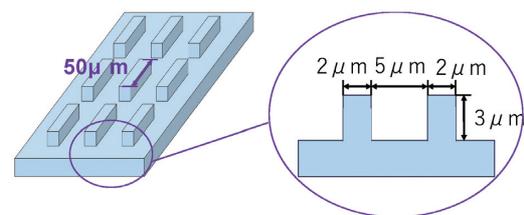


Fig. 4 Structure of the mold.

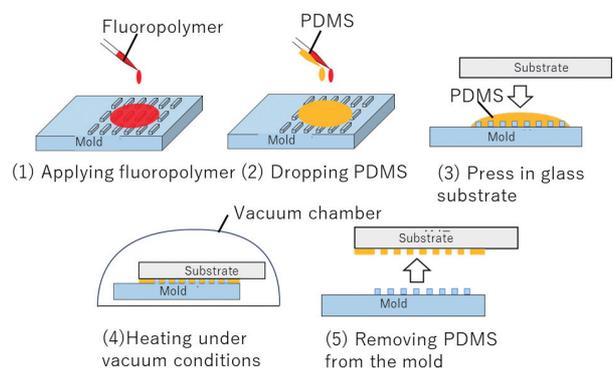


Fig. 5 Fabrication process of alignment-controlling sandwiched spacer.

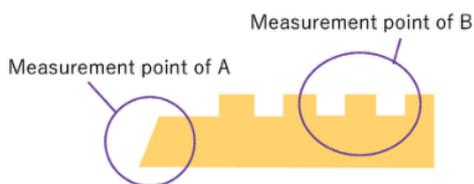


図6 アライメント制御サンドイッチスペーサーの測定点。

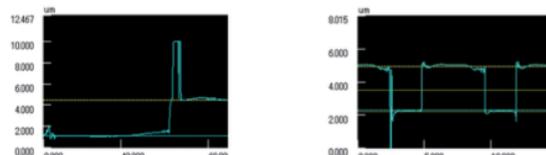


図7 アライメント制御サンドイッチスペーサーの微視的厚みトレース。

アライメント制御サンドイッチスペーサーの測定点を図6に示す。微視的な厚みトレースを図7に示す。図7(a)に示すように、切断部ではスペーサー底部に約 $3.3\mu\text{m}$ の残留膜が存在することが確認された。図7(b)に示すように、PDMS形状は金型形状の厚みと高さを反映している。

#### 4. 平坦基板上でのLCアライメント評価

4.1. 本節では、平板基板上のアライメント制御サンドイッチスペーサーにおけるLCのアライメント状態を観察した。図8は、測定システムを示している。測定は、以下のように、ライン偏光をダイクロイック色素を塗布したLCに照射することにより行う：(1)下側から無偏光を照射する、(2)透過偏光板で直線偏光を照射する、(3)ダイクロイック色素を塗布したLCに照射する。図9は、線偏光を照射したダイクロイック色素によるLCアライメントを示す。

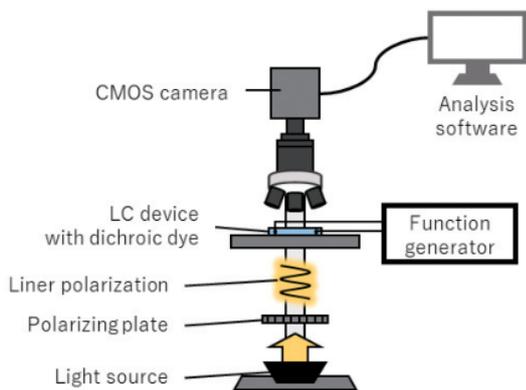


図8 ダイクロイック色素測定システムを搭載したLCデバイス。

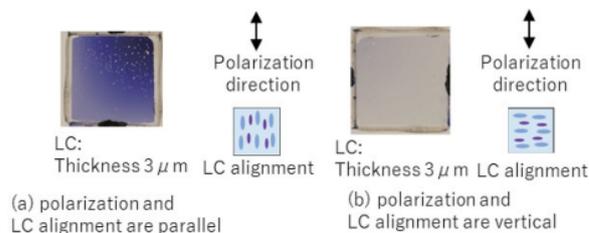


図9 偏光を照射したダイクロイック色素試料を用いたLC。

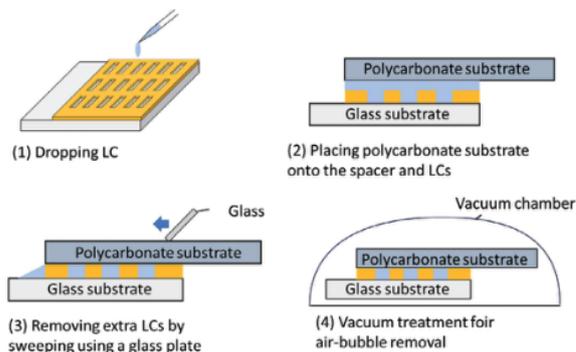
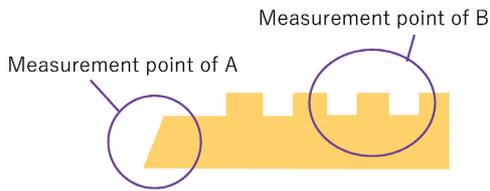


図10 従来のアライメント層とフォトリソグラフィエッチングスペーサーを使用しない作製プロセス。

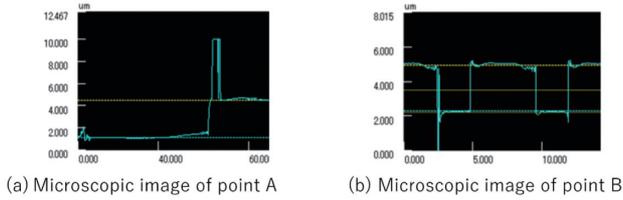
このLCアライメントは、ポリイミドLCアライメントフィルムから構成されている。LC分子の配向方向を同定するために、ネマチックLC(E-7、LCC)の混合物を用いた：99wt%と二色性色素(G241、林原製作所)：1wt%を注入した。図9(a)はLCアライメントとライン偏光の平行性を示し、図9(b)はLCアライメントとライン偏光の垂直性を示す。図9(a)は高い吸収を示している。図9(b)は低吸収を示す。ゲストホスト効果<sup>[11]</sup>は、二色性色素分子がLCの分子配列に沿って整列するとき起こる。したがって、偏光観察によりLCのアライメント状態を明らかにすることができる。注入プロセスを図10に示す。ガラス基板はインジウムスズ酸化物(ITO)でコーティングされている。ポリカーボネート基板はインジウム亜鉛酸化物(IZO)でコーティングされている。アライメントフィルムがない。ガラス基板上に作製したアライメント制御サンドイッチスペーサー上にLCを滴下し、その上にポリカーボネート基板を置き、真空引きを行った。ポリカーボネート基板は柔軟である。ポリカーボネート基板は、スペーサー上部とポリカーボネート基板との間の余分なLCを除去するために上から掃引されたので、ここではポリカーボネート基板を使用した。

#### 4.2. LCアライメントの評価

直線偏光下でのデバイスの顕微鏡像を図11に示す。図11(a)は、図11(b)よりも明瞭な光吸収を示している。本論文で使用したダイクロイック色素は、その長軸方向が光に平行である場合に強い光吸収の特性を有する。



**Fig. 6** Measurement points of the alignment-controlling sandwiched spacer.



**Fig. 7** Microscopic thickness trace of the alignment-controlling sandwiched spacer.

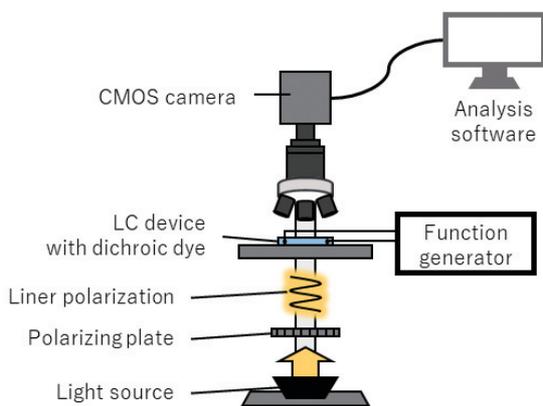
scanning microscope. The measurement points of alignment-controlling sandwiched spacer are shown in Fig. 6. The microscopic thickness trace are shown in Fig. 7. As shown in Fig. 7 (a), it was confirmed that there was a residual film of about 3.3 μm at the bottom of the spacer in the cut area. As shown in Fig. 7 (b), the PDMS shape is reflected the thickness and height of the mold shape.

#### 4. LC Alignment Evaluation on Flat Substrates

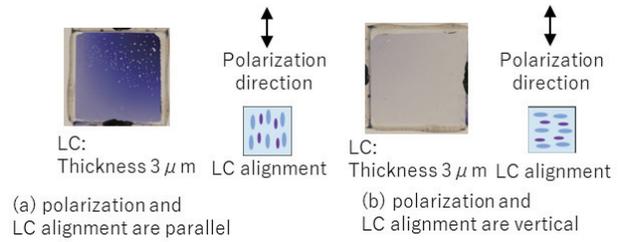
##### 4.1. Fabrication Method of flat Substrate Devices

In this section, the alignment state of LC in the alignment-controlling sandwiched spacer on a flat substrate was observed. Fig. 8 illustrates the measurement system. The measurement is performed by irradiating line polarized light onto an LC with dichroic dye as, as follows: (1) Unpolarized light is irradiated from the lower side, (2) linearly polarized with a transmitting polarizing plate, and (3) irradiated onto the LC with dichroic dye.

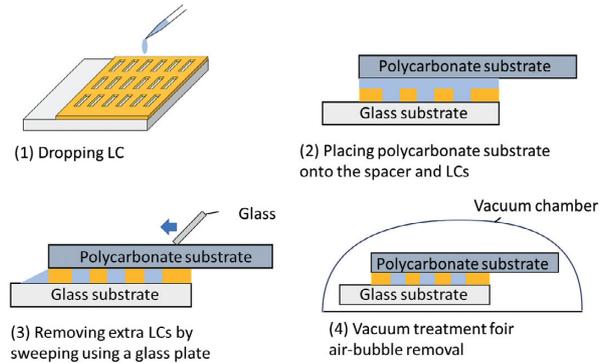
Fig. 9 shows LC alignment with dichroic dye irradiated with line polarized light. This LC alignment



**Fig. 8** LC device with dichroic dye measurement system.



**Fig. 9** LC with dichroic dye sample irradiated by polarized light.



**Fig. 10** Fabrication process without conventional alignment layers and photolithography etched spacer.

consists of a polyimide LC alignment film. To identify the alignment direction of LC molecules, a mixture of nematic LC (E-7, LCC): 99 wt% and dichroic dye (G241, Hayashibara Co., Ltd): 1 wt% was injected. Fig. 9(a) shows the parallelism of LC alignment and line polarized light; Fig. 9(b) shows the perpendicularity of LC alignment and line-polarized light. Fig. 9(a) shows high absorption. Fig. 9(b) shows low absorption. The guest-host effect [11] occurs when dichroic dye molecules are aligned along the molecular arrangement of the LC. Therefore, the alignment state of the LC can be revealed by polarized light observation. The injection process is shown in Fig. 10. Glass substrate is coated with indium tin oxide (ITO). Polycarbonate substrate is coated with indium zinc oxide (IZO). There is no alignment film.

A drop of LC was on an alignment-controlling sandwiched spacer fabricated on a glass substrate, a polycarbonate substrate was placed on top of it, and a vacuum was drawn. The polycarbonate substrate is flexible. Because the polycarbonate substrate was swept from above to remove excess LC between on the top of the spacer and the polycarbonate substrate, the polycarbonate substrate was used here.

##### 4.2. Evaluation of LC Alignment

Microscopic images of the device under linearly polarized light are shown in Fig. 11. Fig. 11 (a) shows clearer light absorption than Fig. 11 (b). The dichroic dye used in this paper has a property of strong light absorption when its long axis direction is parallel to the

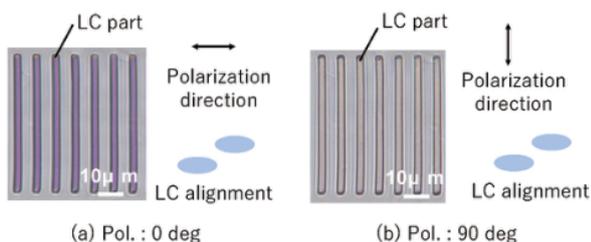


図11 デバイスの顕微鏡写真

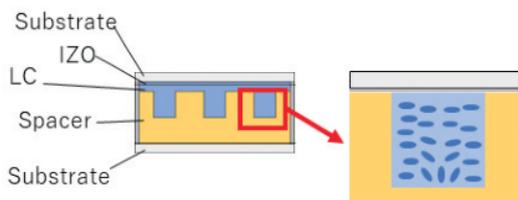


図12 残留フィルムにおけるLCアライメント。

直線偏光の方向である。この結果は、LC分子の長軸がPDMS壁に対して垂直に配列していることを意味し、これは初期のLC配列がうまく制御されていることを意味する。図12に示すように、残留フィルムはLC方向に影響を与える可能性がある。しかし、スペーサー間の面積が大きい壁領域は壁の整列に影響され、多くのLC分子は壁に対して垂直に整列している。トップIZOはLCアライメントを作成しないため、LCアライメントに影響を与えない。

図13は、LCをガラスに垂直に配置した場合のクロスニコルス測定モデルを示している。図13(a)は垂直入射光に対するクロスニコルスモデルである。図13(b)は、入射光を傾けた場合のクロスニコルスモデルを示している。LCデバイスを2枚の交差した分極板で挟む。LCアライメントと入射光が平行であれば、リターデーションは発生しない。一方、LCアライメントと入射光が平行でない場合、リターデーションが発生する。図13(a)に示すように、底部からの光は偏光板を通過し、直線偏光になる。

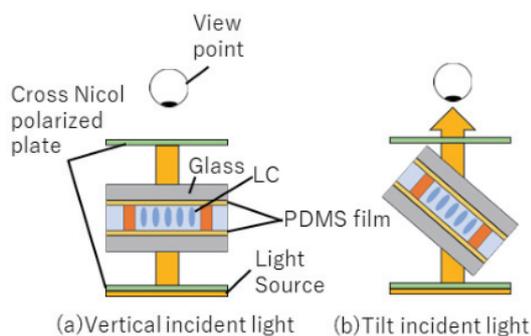


図13 ニコルを交差させた場合の傾斜入射光照射の模式図。

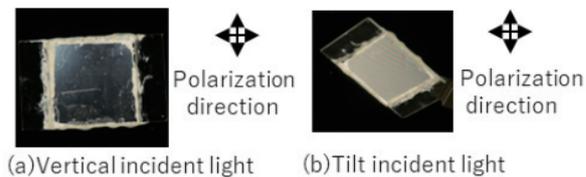


図14 垂直入射光と傾斜入射光で交差ニコルを測定したLC試料。

遅延がない場合、偏光はLCデバイスを通り、偏光は上部の交差偏光子によって吸収される。逆に、図13(b)に示すように、傾いたLCデバイスではリターデーションが発生し、底面からの直線偏光がもう一方の偏光に変化し、光は上部の交差偏光子を介して伝送される。図14は、交差ニコルを測定したLC試料である。図14(a)は垂直入射光のクロスニコルス測定である。図14(b)は入射光を傾けた状態でのクロスニコルス測定である。図14(a)に示すように、垂直入射光交差ニコルでは、図13(a)に示すように、光が吸収される。また、図14(b)に示すように、図13(b)のように、傾いた入射光交差ニコルで光が透過する。このように、図13のモデルで想定されているように、LCデバイスは垂直方向に配置されている。

電圧を印加したデバイスに入射した直線偏光の顕微鏡像を図15に示す。ガラス基板はITOでコーティングされている。ポリカーボネート基板はIZOでコーティングされている。アライメント膜はない。したがって、電極はアライメントに影響を与えない。図15(a)は0 Vrms印加時、図15(b)は10 Vrms印加時、図15(c)は20 Vrms印加時、図15(d)は30 Vrms印加時よりも明瞭な光吸収を示す。この結果は、LC分子の長軸が基板に対して垂直に並んでいることを示唆している。電圧透過率特性は図16の通りである。この透過率にはPDMS壁が含まれている。

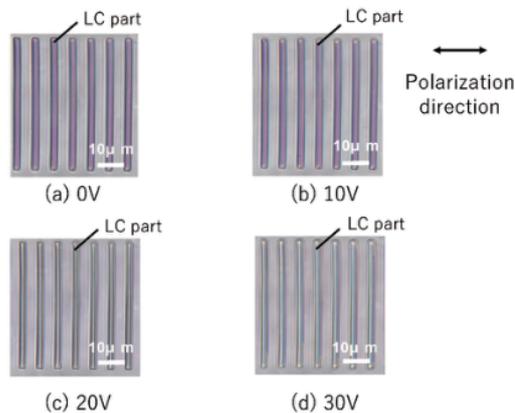


図15 電圧印加時のデバイスの顕微鏡写真。

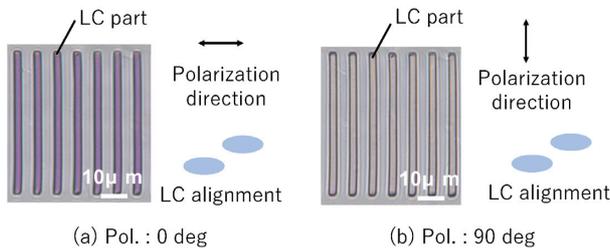


Fig. 11 Microscopic images of the device.

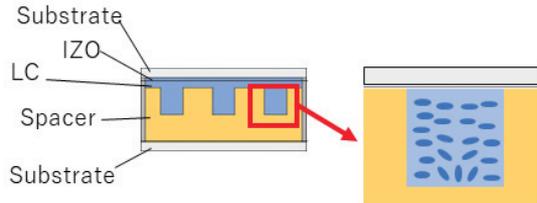


Fig. 12 LC alignment at residual film.

direction of linear polarization. This result implies that the long axis of the LC molecules is aligned perpendicular to the PDMS wall, which means that the initial LC alignment is successfully controlled. As shown in Fig. 12, the residual film may affect the LC direction. However, wall regions with large areas between spacers are affected by the wall alignment, and many LC molecules are aligned perpendicular to the wall. The top IZO does not affect the LC alignment because it does not create an LC alignment.

Fig. 13 illustrates the crossed-nicols measurement model when the LC is aligned perpendicular to the glass. Fig. 13(a) illustrates the crossed-nicols model for vertically incident light. Fig. 13(b) illustrates the crossed-nicols model for tilted incident light. A LC device is sandwiched between two crossed polarizing plates. If the LC alignment and the incident light are parallel, no retardation occurs. In contrast, if the LC alignment and the incident light are not parallel, retardation occurs. As shown in Fig. 13(a), light from the bottom passes through the polarizer and becomes linearly polarized

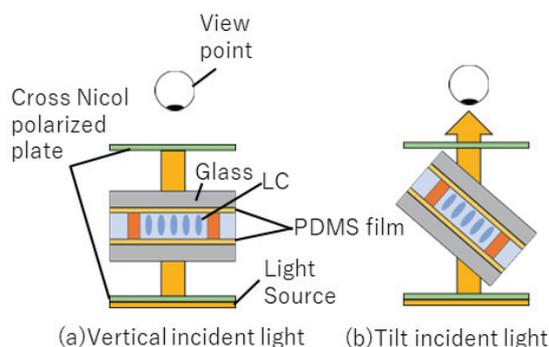


Fig. 13 Schematic diagram of tilted incident light irradiation under crossed nicols.

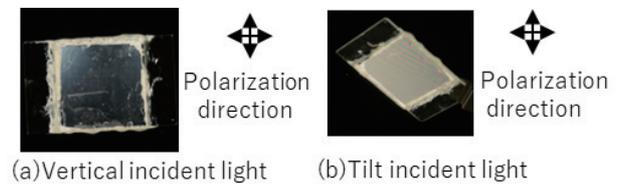


Fig. 14 LC sample with crossed nicols measurement at vertical and tilted incident light.

light. Without retardation, the polarized light passes through the LC device, and the polarized light is absorbed by the crossed polarizers at the top. Conversely, as shown in Fig. 13(b), retardation occurs in the tilted LC device; the linear polarization from the bottom changes to the other polarization, and the light transmits through the crossed polarizers at the top. Fig. 14 shows a LC sample with measured crossed nicols. Fig. 14(a) is crossed-nicols measurement of vertically incident light. Fig. 14(b) is a crossed-nicols measurement with a tilted incident light. As shown in Fig. 14(a), light is absorbed in the vertically incident light-crossed nicols, as shown in Fig. 13(a). Also, as shown in Fig. 14(b), light is transmitted at the tilted incident light-crossed nicols, as in Fig. 13(b). Thus, the LC devices are aligned vertically, as assumed in the model in Fig. 13.

The microscopic images of linearly polarized light incident on the device to which the voltage was applied are shown in Fig. 15. Glass substrate is coated with ITO. Polycarbonate substrate is coated with IZO. There are no alignment film. Thus, electrode is not affect alignment Fig. 15(a) with 0 Vrms applied and Fig. 15(b) with 10 Vrms applied shows clearer light absorption than Fig. 15(c) with 20 Vrms applied and Fig. 15(d) with 30 Vrms applied. This result implies that the long axis of the LC molecules is aligned perpendicular to substrates. The voltage transmittance characteristics are as shown in Fig. 16. This transmittance includes PDMS wall. Fig. 16 indicates that the light absorption is

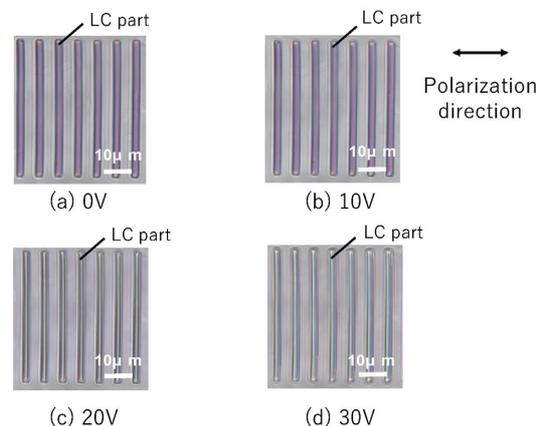


Fig. 15 Microscopic image of the device when voltage is applied.

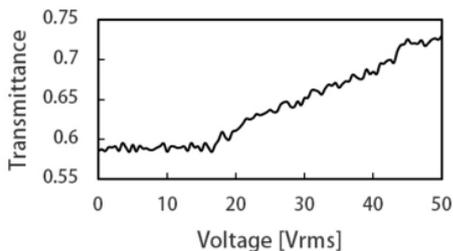


図 16 デバイスの電圧透過率特性。

図16より、約18Vrmsから光吸収が弱まっていることがわかる。この傾向は、図15の吸収と一致している。この測定は、ダイクロイック色素の最大吸収波長である560nmの光で行った。これらの結果は、電圧印加によるLCアライメント制御に成功したことを意味する。必要な高電圧は、スペーサー下の残留膜に大きな電界が印加されるためである。

4.3. 駆動電圧を下げるために、アライメント制御サンドイッチスペーサーの残留電圧をLTIL (Liquid Transfer Imprint Lithography)<sup>[12]</sup>で薄くした。LTILによる残留膜の薄膜化方法を図17に示す。通常、基板上に適量以上の液体が滴下され、不均一な膜となる。ピールオフとプレスにより、適切な量の液体を使用することで、膜厚を均一にし、残留膜量を減少させることができる。ピールオフとプレスは液滴で行われるので、フィルムが壊れないようにする。

PDMSでコーティングした基板にモールドを押し付ける。基板からカビを剥がして剥がし。金型を別の基板に交換する。剥がしを繰り返し、型を交換する。これらの処理を行うことで、過剰なPDMSが除去される。LTILで作製したアライメント制御サンドイッチスペーサーの共焦点レーザー走査顕微鏡像を図18に示すが、これは図7(a)と同じである。

図18に示すように、残留膜は3.3 $\mu$ mに減少していることがわかった。このアライメント制御サンドイッチスペーサーを用いて、図19と同じ手順で作製したデバイスの電圧透過率特性を下図に示す。

図 19 に LTIL

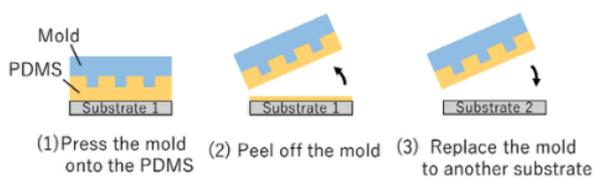


Fig. 17 Thinning of residual film by LTIL.

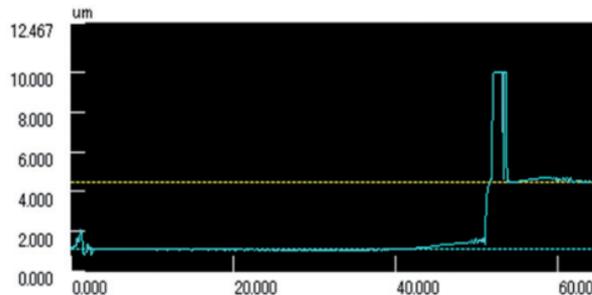


図18 残留膜の微視的な厚みトレース。

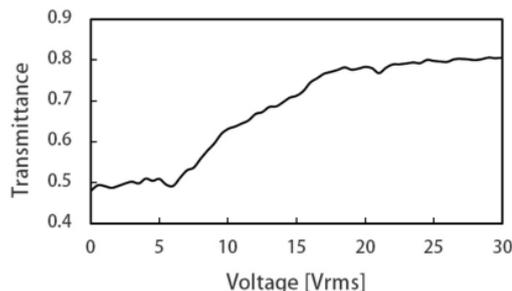


図 19 LTIL で作製したデバイスの電圧透過率特性。

で作製したデバイスの電圧透過率特性を示す。この透過率には PDMS 壁も含まれている。光吸収は約6Vrmsから弱められるため、LTILにより駆動電圧は図16の18Vrmsより約1/3に低下し、低電圧となる。

## 5. 曲線基板上でのLCアライメント評価

### 5.1. 曲線基板の作製方法

#### Devices

これまで、LCのアライメントと電圧応答を確認するために、平坦な基板上にデバイスを作製してきた。しかし、固定曲率LCDを実現するためには、アライメントを制御するサンドイッチスペーサーを平坦な基板から曲面基板に転写する必要がある。そこで、直径45mm、深さ6mmのウォッチガラスを基板として、曲面基板デバイスを作製した。製造方法を図20に示す：(a)スペーサーを剥がす (b)スペーサーを移す (c)スペーサーをウォッチガラスの上に置く (d)LCを落とす (f)上層を配置する。図20(a)では、図10と同じ方法でスペーサーを作製している。このように、スペーサーには図6に示すような残留膜がある。図12に示すように、LCアライメントは残留膜の影響を受ける。図20(e)では、無印加電圧LCアライメント測定のために上層をウォッチガラスとし、印加電圧LCアライメント測定のためにPDMS膜をスクイーズしている。

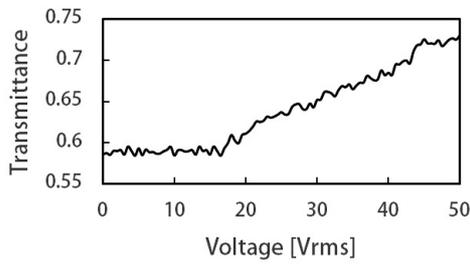


Fig. 16 Voltage transmittance characteristics of the device.

weakened from about 18 Vrms. This trend is matched to Fig. 15 absorption. This measurement was performed with light at 560 nm, the wavelength of maximum absorption of the dichroic dye. These results mean that the LC alignment has been successfully controlled by the application of voltage. The high voltage required is due to the large electric field applied to the residual film below the spacer.

### 4.3. Reduce Drive Voltage by thinner residual film

To reduce the drive voltage, the residual film of the alignment-controlling sandwiched spacer was thinned by the LTIL (Liquid Transfer Imprint Lithography) [12]. The method of thinning the residual film by the LTIL is shown in Fig. 17. Usually, more than the right amount of liquid is dropped onto the substrate, resulting in a non-uniform film. Peel-off and pressing make the film thickness uniform and reduce the amount of residual film by using the right amount of liquid. Peel-off and pressing are performed with a drop of liquid, so the film will not break.

The mold is pressed onto the substrate coated with PDMS. Peel off the mold from the substrate. Replace the mold to another substrate. Repeat peeling and replacing the mold. By performing these processes, excess PDMS is removed. A confocal laser scanning microscope image of the alignment-controlling sandwiched spacer fabricated by LTIL is shown in Fig. 18 which same as Fig. 7(a).

As shown in Fig. 18, the residual film was found to be reduced to 3.3  $\mu\text{m}$ . The voltage transmittance characteristics of the device fabricated using this alignment-controlling sandwiched spacer by the same procedure as Fig. 19 are shown in the following figure.

Fig. 19 shows the voltage transmittance characteristics of

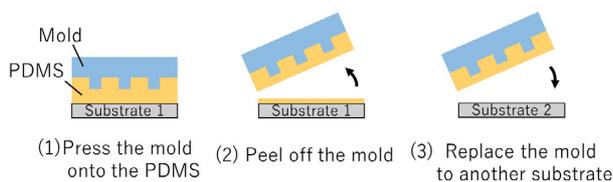


Fig. 17 Thinning of residual film by LTIL.

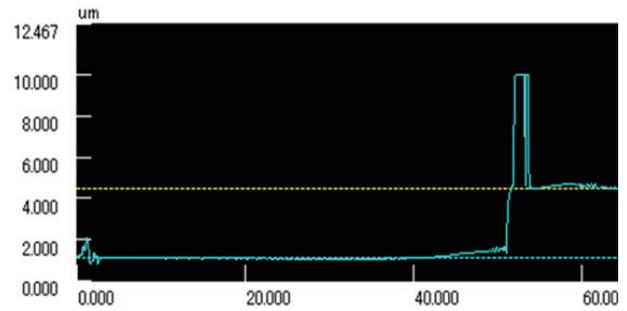


Fig. 18 Microscopic thickness trace of the residual film.

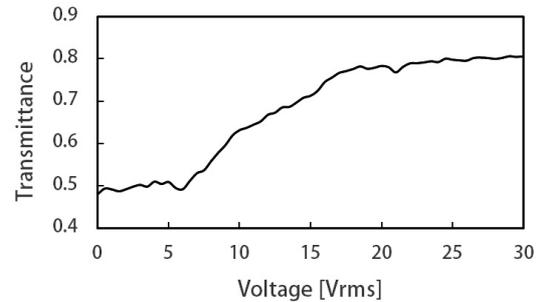


Fig. 19 Voltage transmittance characteristics of the device fabricated with LTIL.

the device fabricated with LTIL This transmittance includes PDMS wall. The light absorption is weakened from about 6 Vrms Therefore, the drive voltage is reduced to about one-third than 18 Vrms in Fig. 16 by LTIL, resulting in lower voltage.

## 5. LC Alignment Evaluation on Curved Substrates

### 5.1. Fabrication Method of Curved Substrate Devices

Until now, we have fabricated devices on flat substrates to confirm LC alignment and voltage response. However, to realize fixed-curvature LCDs, it is necessary to transfer the alignment-controlling sandwiched spacer from flat substrates to curved substrates. Therefore, we fabricated a curved substrate device using a watch glass with a diameter of 45 mm and a depth of 6 mm as a substrate. The fabrication method is shown in Fig. 20. and is described as follows: (a) Peeling off spacer (b) Transfer spacer (c) Placing spacer on top of watch glass (d) Dropping LC (f) Placing upper layer. In Fig. 20(a), the spacer is fabricated using the same method as in Fig. 10. Thus, the spacer has residual films, as shown in Fig. 6. LC alignment is affected by residual films, as shown in Fig. 12. In Fig. 20(e), the upper layer was watch glass for the no-applied-voltage LC alignment measurement and squeezed PDMS film for the applied-voltage LC

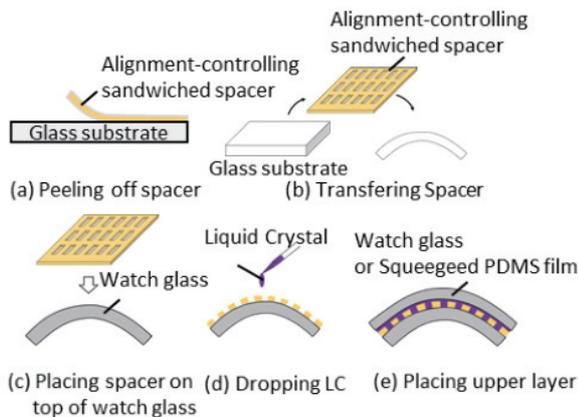


図 20 曲面基板デバイスの作製プロセス

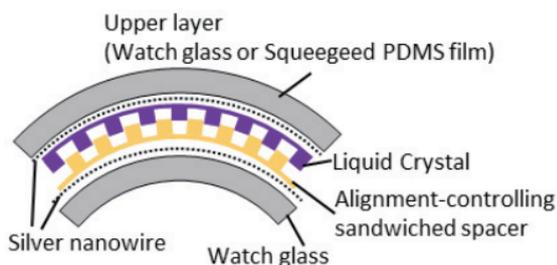


図21 カーブした基板デバイスの構造

図21に曲面基板デバイスの構造を示す。アライメントを制御するサンドイッチスペーサーと液晶は、銀ナノワイヤー、時計ガラス、上層(時計ガラスまたは絞りPDMSフィルム)で挟まれている。

フラット基板上に作製したアライメント制御サンドイッチスペーサーをウォッチガラス上に交換する。次に、99 wt% E-7と1 wt% G241の混合物を滴下した。最後に、下部基板と同じウォッチガラスを上にした。

同じ時計ガラスで2つの曲がった基板を使用することで、基板間に隙間が生じる。ギャップが生じた場合、2つの曲面基板間のLCを駆動するために非常に高い電圧が必要となる。そこで、下部基板に時計ガラス、上部基板にPDMSを用い、電圧印加用のデバイスとして曲面基板デバイスも作製した。PDMSを基板として用いることで、PDMSの柔軟性により、2つの基板間の隙間を回避することが可能となる。本報告では、プラスチック基板や撥水性PDMSの収縮・膨張に対応した銀ナノワイヤーActi vegrid Ink Gen 5(C3 nano Inc.)を電極として使用した。電極コーティングの方法を図22に示す。そして、以下のように記述される。(a) 銀ナノワイヤー溶液の滴下。(b) 時計ガラスを傾けることで広がる。(c) 温風を送信して溶媒を揮発させる。



図 22 電極の塗布方法

このコーティング法では、スペーサーと外側電極間の抵抗は約5kΩである。銀ナノワイヤーは保護層でコーティングされているため、LCのアライメントに影響を与えないと考えられる。

銀ナノワイヤー溶液を曲面基板上に滴下し、曲面基板を傾けて広げた。溶媒は温風を送信して揮発させた。銀ナノワイヤー電極は、同じ手順でPDMS基板上に形成した。

### 5.2. LCアライメントの評価

図23は、2つの時計ガラスで作製したデバイスを直線偏光下で作製した顕微鏡写真である。図23から、アライメント制御によるサンドイッチスペーサーの構造が維持されていることがわかる。さらに、図23(a)は図23(b)よりも明瞭な光吸収を示している。この結果は、LC分子の長軸がPDMS壁に垂直に並んでいることを示唆している。PDMSの上部の壁と上部のガラスの間に隙間がある。図24のように、ギャップLCが上のガラスで整列していると考えられる。図25. は、電圧を印加したPDMS基板をデバイスに入射させた直線偏光の顕微鏡写真である。図25(a)は図25(b)と比較して光吸収を示している。この結果は、LC分子の長軸が基板に対して垂直に並んでいることを示している。

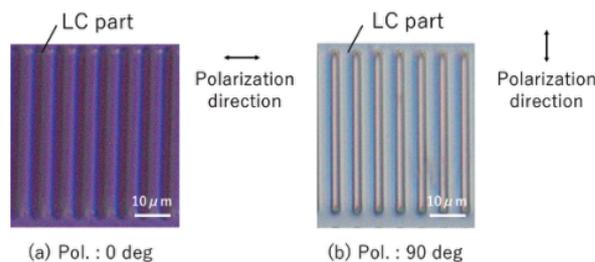


図 23 曲面基板デバイスの顕微鏡写真。

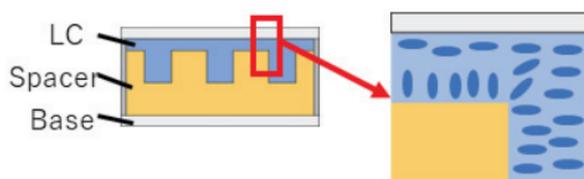


図24 従来のアライメント層とフォトリソグラフィエッチングスペーサーを使用しない作製プロセス。

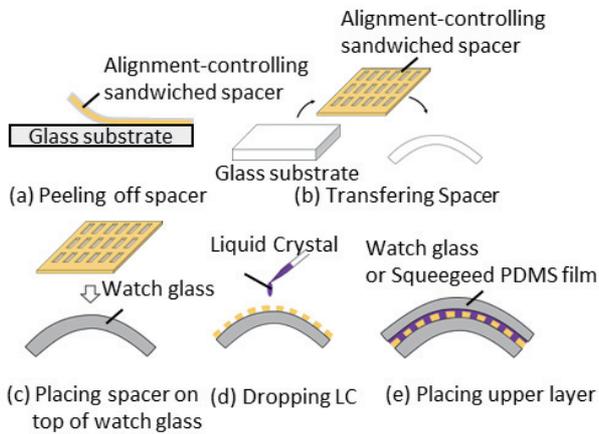


Fig. 20 Fabrication process of the curved substrate device.

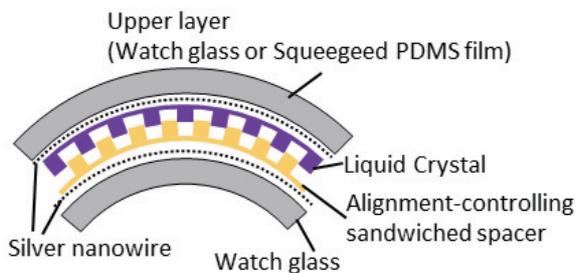


Fig. 21 Curved Substrate Devices structure.

alignment measurement. Fig. 21 illustrates the structure of a curved substrate device. The alignment-controlling sandwiched spacer and the liquid crystal are sandwiched between silver nanowire, watch glass, and an upper layer (watch glass or squeezed PDMS film).

An alignment-controlling sandwiched spacer fabricated on a flat substrate is replaced on a watch glass. Next, a mixture of 99 wt% E-7 and 1 wt% G241 was dropped. Finally, the same watch glass as the lower substrate was placed on top.

The use of two curved substrates with the same watch glass creates a gap between the substrates. If a gap is created, a very high voltage is required to drive the LC between the two curved substrates. Therefore, we also fabricated curved substrate devices using a watch glass for the lower substrate and PDMS for the upper substrate as devices for voltage application. By using PDMS as a substrate, the flexibility of PDMS makes it possible to avoid gaps between the two substrates. This report, silver nanowires Activegrid Ink Gen 5(C3 nano Inc.) were used as electrodes, which are compatible with the shrinkage and expansion of plastic substrates and water-repellent PDMS. The electrode coating method is shown in Fig. 22. And described as follows. (a) Dropping silver nanowire solution. (b) Spreading by tilting watch glass. (c) Volatilizing the solvent by sending warm air. In this coating method, the resistance between the

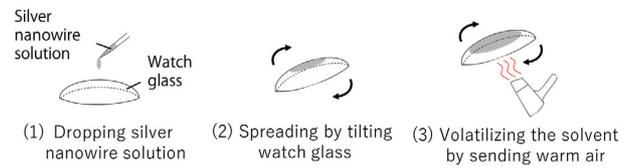


Fig. 22 Electrode application method.

spacer and the outer electrode is approximately 5 k $\Omega$ . Silver nanowires are not expected to affect LC alignment, since the nanowires are coated with a protective layer.

The silver nanowire solution was dropped onto the curved substrate and spread it by tilting the curved substrate. The solvent was volatilized by sending warm air. Silver nanowire electrodes were formed on PDMS substrates by the same procedure.

## 5.2. Evaluation of LC Alignment

Fig. 23 shows microscopic images of the device fabricated with two watch glass under linearly polarized light. From Fig. 23, it can be seen that the structure of alignment-controlling sandwiched spacer is maintained. Furthermore, Fig. 23 (a) shows clearer light absorption than Fig. 23 (b). This result implies that the long axis of the LC molecules is aligned perpendicular to the PDMS wall. There is a gap between the top PDMS wall and top glass. It is thought the gap LC is aligned by the top glass as Fig. 24.

Fig. 25. shows microscopic images of linearly polarized light incident on the device with PDMS substrate to which the voltage is applied. Fig. 25 (a) shows a light absorption compared to Fig. 25 (b). This result indicates that the long axis of the LC molecules is aligned perpendicular to the substrates. However, absorption of

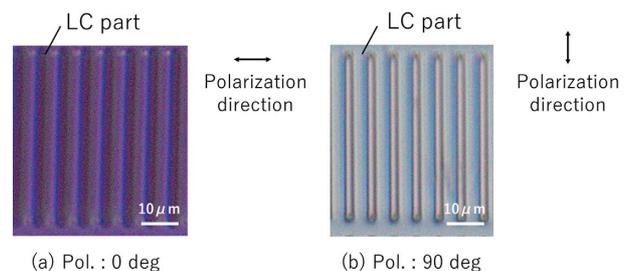


Fig. 23 Microscopic images of the curved substrate device.

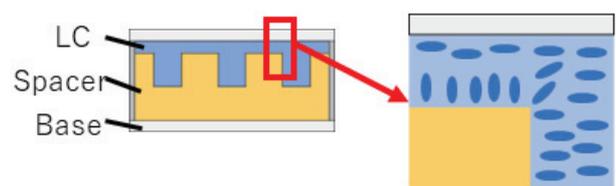


Fig. 24 Fabrication process without conventional alignment layers and photolithography etched spacer.

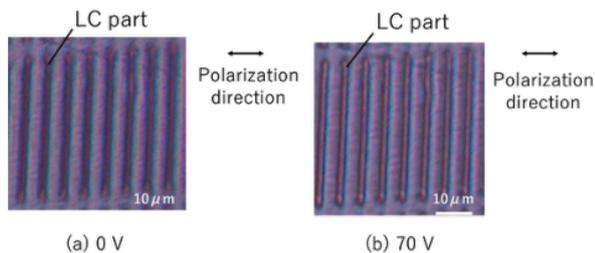


図 25 電圧印加時の曲面基板デバイスの顕微鏡写真。

しかし、壁面近傍ではダイクロミック色素による光の吸収が観察され、LC駆動電圧が不十分であることが示された。これは、電極形成が不十分であること、LCへの電圧印加が不十分であることによる高抵抗が原因と考えられる。このようにして、曲面基板上のLCのアライメント制御を実現した。

## 6. Conclusions

本論文では、固定曲率LCDを実現するために、アライメント制御サンドイッチスペーサを提案・製作した。その結果、PDMSを用いた表面アライメント効果により、アライメント膜を使用せずにLCのアライメントを制御できるデバイスを作製した。また、このスペーサーを曲面基板で作製した液晶に使用し、液晶の配向を制御できることを示した。

## 7. 謝辞

大日本印刷株式会社に感謝する。金型を供給する場合

東北大学石辺貴弘教授、長岡技術科学大学柴田陽生助教授の有益な議論に感謝する次第である。

## References

- 1) Y. Fukuda: "Tasks in Organic EL Display Devices", Journal of The Surface Science Society of Japan, 25, 9, pp.594-598 (2004)
- 2) Shuichi Honda, Takahiro Ishinabe, Shogo Takashi, Yohei Shibata: "Analysis on Bending Deformation of Plastic Substrates of Flexible LiquidCrystal Displays", J. Inst. Image Inf. Telev. Eng., 72, pp.131-135 (2018)
- 3) You-Jin Lee, Se-Jin Jang, Jong-Wook Jung, Hak-Rin Kim, Min Young Jin, Yoonseuk Choi and Jae-Hoon Kim: "Mechanical stability of pixel-isolated liquid crystal mode for flexible display application." Molecular Crystals and Liquid Crystals 458.1 pp.81-87 (2006)
- 4) Se-Jin Jang , Jong-Wook Jung, Hak-Rin Kim , Minyoung Jin and Jae-Hoon Kim: "Stability-enhanced pixel isolation method for flexible liquid crystal displays." Japanese journal of applied physics 44.9R p.p. 6670 (2005)
- 5) Jae-Hyun Kang, Kwang-Soo Bae, Seung-Woo Yi, Jae-Hoon Kim and Chang-Jae Yu: "Substrate-Assembling Technique using Adhesive Patterned Spacers for Flexible Liquid Crystal Displays." 한국정보디스플레이학회: 학술대회논문집 p.p. 218-220 (2009)

- 6) Jong-Wook Jung, You-Jin Lee, Min-Soo Shin, Hak-Rin Kim and Jae-Hoon Kim: "Multi-domain liquid crystal alignment by micro-contact printed polymer layers." Molecular Crystals and Liquid Crystals 470.1 p.p. 183-190 (2007)
- 7) Jae-Hyun Kang, Kwang-Soo Bae, Seung-Woo Yi, Jong-Sun Choi, Jae-Hoon Kim and Chang-Jae Yu: "Electro-optic stability in a flexible liquid crystal display with adhesive spacers under bending deformation." IDW'09-Proceedings of the 16th International Display Workshops. Vol. 1, p.p. 173-176 (2009)
- 8) Hiroto Sato, Hideo Fujikake, Hiroshi Kikuchi and Taiichiro Kurita: "Bending tolerance of ferroelectric liquid crystal with polymer walls fastening plastic substrates." Japanese journal of applied physics 42.5A p.p. L476-L478 (2003)
- 9) N. Matsuura, S. Kobayashi: "Interaction between Liquid Crystals and Treated Solid Surface ; Single Crystallization", Journal of The Surface Science of Japan, 4, 3, pp.132-140 (1983)
- 10) J. Zhou, A.V. Ellis and N.H. Voelcker: "Recent developments in PDMS surface modification for microfluidic devices", Electrophoresis, 31, 1, pp.2-16 (2010)
- 11) G.H. Heilmeyer and L.A. Zanoni: "GUEST-HOST INTERACTIONS in NEMATIC LIQUID CRYSTALS. A NEW ELECTRO-OPTIC EFFECT", Appl Phys Lett, 13, 3, pp.91-92 (1968)
- 12) N. Koo, J. Wuk Kim, M. Otto, C. Moormann and H. Kurz: "Liquid transfer imprint lithography: A new route to residual layer thickness control," Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement and Phenomena, 29, 6 (Nov. 2011)



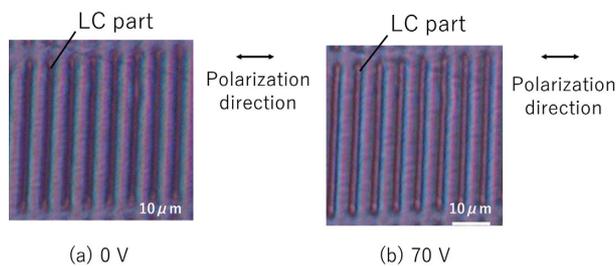
**Tatsuya Kanda** received a B.E. degree from Tohoku University, Sendai, Japan, in 2022. He is a Master's student in the Department of Electronic Engineering at the Graduate School of Engineering, Tohoku University. His research interest is the Alignment Control of LC Layer on Curved Substrates by Alignment-Controlling Sandwiched Spacers.



**Masakazu Nakatani** received his M.S. in Engineering from Nara Institute of Science and Technology (NAIST) in March 2010 and Ph.D. in Engineering from Nagaoka University of Technology in December 2020. From 2010-2016, he joined Clean Venture 21, a low-concentration photovoltaics venture company, as a researcher; from 2020-2022, he worked as a postdoctoral researcher at Osaka University, studying light control by cholesteric liquid crystals. In February 2023, he joined Graduate School of Engineering, Tohoku University as an Assistant Professor.



**Hideo Fujikake** received M.E and Ph.D. degrees from Tohoku University, Japan, in 1985 and 2003, respectively. In 1985, he joined the Japan Broadcasting Corporation (NHK). In 1988-2012, he worked for NHK Science and Technology Research Laboratories. From 2006, he was a visiting professor at Department of Physics, Graduate School of Science, Tokyo University of Science. Since 2012, he has been a professor at the Department of Electronic Engineering, Tohoku University. He received the Best Paper Award from the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (IEICE) in 2001 and 2017, the Best Paper Award from the Japanese Liquid Crystal Society (JLCS) in 2001, 2015 and 2020, the Niwa-Takayanagi Best Paper Award from the Institute of Image Information and Television Engineers of Japan (ITE) in 2003 and 2009, and the Electronics Society Award from IEICE in 2013. His current interests are concerned with flexible liquid crystal displays and functional optical devices including holography. He also served as a Japan Chapter Chair in IEEE Consumer.



**Fig. 25** Microscopic image of curved substrates device when voltage is applied.

light by the dichroic dye was observed near the wall, indicating that the LC driving voltage was insufficient. This may be due to high resistance caused by insufficient electrode formation, and insufficient voltage application to the LC. In these ways, we have achieved alignment control of LCs on curved substrates.

## 6. Conclusions

In this paper, we proposed and fabricated alignment-controlling sandwiched spacer to realize a fixed-curvature LCD. As a result, we fabricated devices in which the alignment of the LC can be controlled without using an alignment film due to the surface alignment effect using PDMS. We also used this spacer in an LCD fabricated with a curved substrate, and showed that LC alignment can be controlled.

## 7. Acknowledgements

The authors would like to thank to Dai Nippon Printing Co., Ltd. for supplying molds.

The authors would like to thank to Professor Takahiro Ishinabe of Tohoku University and Assistant Professor Yosei Shibata of Nagaoka University of Technology for useful discussion.

## References

- 1) Y. Fukuda: "Tasks in Organic EL Display Devices", *Journal of The Surface Science Society of Japan*, 25, 9, pp.594-598 (2004)
- 2) Shuichi Honda, Takahiro Ishinabe, Shogo Takashi, Yohei Shibata: "Analysis on Bending Deformation of Plastic Substrates of Flexible LiquidCrystal Displays", *J. Inst. Image Inf. Telev. Eng.*, 72, pp.131-135 (2018)
- 3) You-Jin Lee, Se-Jin Jang, Jong-Wook Jung, Hak-Rin Kim, Min Young Jin, Yoonseuk Choi and Jae-Hoon Kimet: "Mechanical stability of pixel-isolated liquid crystal mode for flexible display application." *Molecular Crystals and Liquid Crystals* 458.1 pp.81-87 (2006)
- 4) Se-Jin Jang , Jong-Wook Jung, Hak-Rin Kim , Minyoung Jin and Jae-Hoon Kim: "Stability-enhanced pixel isolation method for flexible liquid crystal displays." *Japanese journal of applied physics* 44.9R p.p. 6670 (2005)
- 5) Jae-Hyun Kang, Kwang-Soo Bae, Seung-Woo Yi, Jae-Hoon Kim and Chang-Jae Yu: "Substrate-Assembling Technique using Adhesive Patterned Spacers for Flexible Liquid Crystal Displays." *한국정보디스플레이학회: 학술대회논문집* p.p. 218-220 (2009)

- 6) Jong-Wook Jung, You-Jin Lee, Min-Soo Shin, Hak-Rin Kim and Jae-Hoon Kim: "Multi-domain liquid crystal alignment by micro-contact printed polymer layers." *Molecular Crystals and Liquid Crystals* 470.1 p.p. 183-190 (2007)
- 7) Jae-Hyun Kang, Kwang-Soo Bae, Seung-Woo Yi, Jong-Sun Choi, Jae-Hoon Kim and Chang-Jae Yu: "Electro-optic stability in a flexible liquid crystal display with adhesive spacers under bending deformation." *IDW'09-Proceedings of the 16th International Display Workshops*. Vol. 1. p.p. 173-176 (2009)
- 8) Hiroto Sato, Hideo Fujikake, Hiroshi Kikuchi and Taiichiro Kurita: "Bending tolerance of ferroelectric liquid crystal with polymer walls fastening plastic substrates." *Japanese journal of applied physics* 42.5A p.p. L476-L478 (2003)
- 9) N. Matsuura, S. Kobayashi: "Interaction between Liquid Crystals and Treated Solid Surface ; Single Crystalization", *Journal of The Surface Science of Japan*, 4, 3, pp.132-140 (1983)
- 10) J. Zhou, A.V. Ellis and N.H. Voelcker: "Recent developments in PDMS surface modification for microfluidic devices", *Electrophoresis*, 31, 1. pp.2-16 (2010)
- 11) G.H. Heilmeyer and L.A. Zanoni: "GUEST-HOST INTERACTIONS in NEMATIC LIQUID CRYSTALS. A NEW ELECTRO-OPTIC EFFECT", *Appl Phys Lett*, 13, 3, pp.91-92 (1968)
- 12) N. Koo, J. Wuk Kim, M. Otto, C. Moormann and H. Kurz: "Liquid transfer imprint lithography: A new route to residual layer thickness control," *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement and Phenomena*, 29, 6 (Nov. 2011)



**Tatsuya Kanda** received a B.E. degree from Tohoku University, Sendai, Japan, in 2022. He is a Master's student in the Department of Electronic Engineering at the Graduate School of Engineering, Tohoku University. His research interest is the Alignment Control of LC Layer on Curved Substrates by Alignment-Controlling Sandwiched Spacers.



**Masakazu Nakatani** received his M.S. in Engineering from Nara Institute of Science and Technology (NAIST) in March 2010 and Ph.D. in Engineering from Nagaoka University of Technology in December 2020. From 2010-2016, he joined Clean Venture 21, a low-concentration photovoltaics venture company, as a researcher; from 2020-2022, he worked as a postdoctoral researcher at Osaka University, studying light control by cholesteric liquid crystals. In February 2023, he joined Graduate School of Engineering, Tohoku University as an Assistant Professor.



**Hideo Fujikake** received M.E and Ph.D. degrees from Tohoku University, Japan, in 1985 and 2003, respectively. In 1985, he joined the Japan Broadcasting Corporation (NHK). In 1988-2012, he worked for NHK Science and Technology Research Laboratories. From 2006, he was a visiting professor at Department of Physics, Graduate School of Science, Tokyo University of Science. Since 2012, he has been a professor at the Department of Electronic Engineering, Tohoku University. He received the Best Paper Award from the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (IEICE) in 2001 and 2017, the Best Paper Award from the Japanese Liquid Crystal Society (JLCS) in 2001, 2015 and 2020, the Niwa-Takayanagi Best Paper Award from the Institute of Image Information and Television Engineers of Japan (ITE) in 2003 and 2009, and the Electronics Society Award from IEICE in 2013. His current interests are concerned with flexible liquid crystal displays and functional optical devices including holography. He also served as a Japan Chapter Chair in IEEE Consumer.