《연구논문》 Korean Journal of Optics and Photonics, Volume 22, Number 2, April 2011 DOI: 10.3807/KJOP.2011.22.2.090

ITO 박막이 증착된 편광판을 기판으로 하는 액정 셀의 제작

진혜정[1] · 김기한[1] · 박경호[1] · 손필국[2] · 김재창[1] · 윤태훈[1†]

[1]부산대학교 전자전기공학부
㊞ 609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지

[2]경희대학교 정보전자신소재공학과
㊞ 446-701 경기도 용인시 기흥구 서천동 1번지

(2010년 12월 21일 받음, 2011년 2월 7일 수정본 받음, 2011년 2월 7일 게재 확정)

본 논문에서는 액정 디스플레이의 구현에 있어서 필수적인 필름인 편광판에 ITO를 증착하여 기존 액정 디스플레이에서 두께의 대부분을 차지하는 유리기판을 제거함으로써 경략 박형 액정 셀을 구현하였다. 저온(40℃)에서 편광판에 sputtering으로 buffer layer와 ITO를 증착하여 높은 투과율과 낮은 비저항 및 편평도를 확보하였다. 최종적으로 저온공정이 가능한 ion-beam 배향법을 이용하여 액정을 배향하고 액정 셀을 제작하고 전기광학특성을 확인하였다.

Fabrication of a Liquid Crystal Cell Using ITO-deposited Polarizers as Substrates

Hye-Jung Jin[1], Ki-Han Kim[1], Kyoung-Ho Park[1], Phil Kook Son[2],
Jae Chang Kim[1], and Tae-Hoon Yoon[1†]

[1]*School of Electrical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea*
[2]*Department of Advanced Materials Engineering for Information & Electronics, Kyung Hee University, Yongin 446-701, Korea*

(Received December 21, 2010; Revised manuscript February 7, 2011; Accepted February 7, 2011)

We propose a super-thin and light-weight liquid crystal cell, in which glass substrates are eliminated and polarizers are used as substrates. We fabricate a polarizer substrate by depositing a-SiOX as a buffer layer, indium-tin-oxide as a transparent conducting layer, and a-SiOX as an alignment layer on a polarizer sequentially at a low temperature. We use the ion-beam method to align liquid crystals on polarizer substrates.

Keywords: Liquid crystal display, Electro-optical devices, Thin film devices and applications
OCIS codes: (120.2040) Displays; (230.3720) Liquid-crystal devices; (310.7005) Transparent conductive coatings

I. 서 론

액정 디스플레이는 저소비전력, 경량, 박형의 장점을 가지고 있어 디스플레이 소자로 널리 사용되고 있지만, 최근 모바일 디스플레이가 널리 쓰임에 따라 보다 더 얇고 가벼운 디스플레이 소자가 요구되고 있다. 기존 액정 디스플레이에서는 액정 층에 전계를 형성하기 위하여 ITO(indium tin oxide)라는 투명전극을 입힌 유리를 기판으로 널리 사용한다. 그러나, ITO 유리는 디스플레이 패널의 두께와 무게에서 가장 큰 부분을 차지하여, 최근 요구되는 얇고 가벼운 디스플레이를 구현하기에는 적합하지 않다. 또한, 편광제어 패널이 필요하여 두 층의 액정패널을 요구하는 3D 디스플레이 기술에 적용할 경우, 유리로 인한 소자의 두께와 무게 증가가 문제될 수 있다[1-3]. 이 외에도 최근 등장한 전면반사/전면투과 액정 디스플레이의 경우 투과모드 dark시 반사모드 bright가 동시에 구현되는 계조반전을 제거하기 위하여 두 층의 액정층이 필요한데 이로 인해 픽셀면적 대비 소자가 두께가 훨씬 커지게 되므로 반사모드 동작 시 한 sub-pixel로 입사한 빛이 다른 sub-pixel로 출사하는 parallax 문제가 발생되어 시인성에 문제가 생긴다[4-7].

따라서, 초경량박형의 액정 디스플레이를 구현하기 위해 유리를 얇게 가공하는 방법이 발표되었지만[8, 9] 이러한 방법

†E-mail: thyoon@pusan.ac.kr
Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

은 제작공정이 어렵고 비용이 증가하며, 유리의 특성상 두께가 얇아지게 되면 외부충격에 약해져 이동성에 강점을 가진 모바일 디스플레이에 적용하는 데에는 제약이 있다. 이와 같이, 유리 기판은 경량 박형 디스플레이의 적용에 있어 제한적이다.

이에 본 논문에서는 유리 기판 대신 기존의 액정 디스플레이의 외부에 항상 위치하는 얇고 가벼운 편광판에 ITO를 직접 증착하여 유리 기판을 제거하여 편광판을 기판으로 액정 디스플레이를 제작하고자 한다. 디스플레이 기판에 요구되는 편평도를 확보하기 위해 편광판에 sputtering으로 무기막을 증착하여 기판의 편평도를 높여줄 buffer 층[10]을 형성하고 고온 안전성이 없는 편광판에 ITO를 증착시키기 위하여 저온에서 ITO를 증착하여 높은 투과율과 낮은 비저항을 가지는 ITO 증착조건을 확보하였다. 또한, 이온빔 배향법을 적용하여 저온 공정조건을 확보하고 액정의 배향을 구현하였다. 제안된 구조는 ITO 유리를 기판으로 사용한 액정 디스플레이와 동등한 전기광학특성을 가지며 초경량박형 소자를 구현할 수 있었다. 제안한 방법은 모바일 디스플레이, 전반사 전투과 등 얇고 가벼운 기판이 필요한 다양한 액정 디스플레이에 적용될 것으로 기대한다.

II. 제안된 소자의 설계 및 제작

ITO 유리를 기판으로 사용하는 액정 디스플레이는 그림 1과 같이 backlight의 빛을 편광시키는 편광판, 소자의 형태를 유지시켜주는 유리, 액정에 전계를 인가하기 위해 필요한 ITO, 액정을 배향하기 위한 alignment layer가 액정층 위아래에 차례로 구성되어 액정 디스플레이를 구현한다. 그 중 ITO가 증착된 유리는 액정 디스플레이의 무게와 두께의 대부분을 차지한다. 이에, 우리는 편광판에 ITO를 증착하여 기존 액정 디스플레이에서 두껍고 무거운 유리를 제거하여 경량 박형의 액정 디스플레이를 구현하고자 한다.

편광판을 기판으로 사용하기 위해서는 먼저 ITO 층을 증착하여야 한다. 편광판을 구성하는 PVA, TAC 필름은 높은 온도에서 변형이 일어나기 때문에 고온 안정성이 약한 편광판에 ITO를 증착하기 위하여 저온에서 RF magnetron sputtering 공정 조건을 확보하여 증착하여야 한다. RF magnetron sputtering

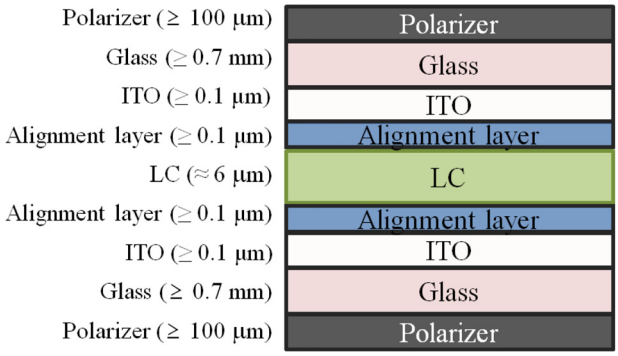


FIG. 1. Configuration of a liquid crystal cell with glass substrates.

을 이용하여 무기막을 증착하는 조건에는 아르곤, 산소 가스 농도 및 비율, RF power 세기, chamber 온도, stage의 회전속도, 초기진공 압력, 작업진공 압력 등이 있는데, 액정 디스플레이의 기판으로 사용되기 위해서는 저온에서 편광판에 증착된 ITO 층이 높은 투과율과 낮은 비저항을 가져야 한다. 본 논문에서는 산소와 아르곤의 농도 비를 변화시켜 가며 ITO를 증착한 편광판의 투과율과 비저항을 비교하여 보았다. 증착 조건은 저온(40℃)에서 초기진공 10^{-6} torr, 작업진공 10^{-2} torr, RF magnetron sputter의 power를 80 W로 설정한 후 산소와 아르곤의 농도는 50 sccm으로 유지하고 저온 상태에서 산소를 첨가하지 않은 상태와 산소를 첨가한 상태를 비교하였을 때 20%이상 투과율 차이가 발생하는 것을 그림 2(a)에서 확인할 수 있었다. 산소를 첨가하였을 때 투과율의 향상을 가져온 결과를 토대로 산소의 첨가 비율에 따른 비저항 값의 변화를 그림 2(b)에 나타내었다. 산소농도가 전체 가스 농도의 5%이상일 때 100 Ω•cm이상의 큰 비저항 값을 갖는 것을 확인할 수 있었고 전체 가스 농도를 50 sccm으로 유지한 상태에서 산소의 비율을 2%로 유지하였을 때, 높은 투과율 확보와 동시에 낮은 비저항 값을 얻을 수 있는 조건을 확보하였다.

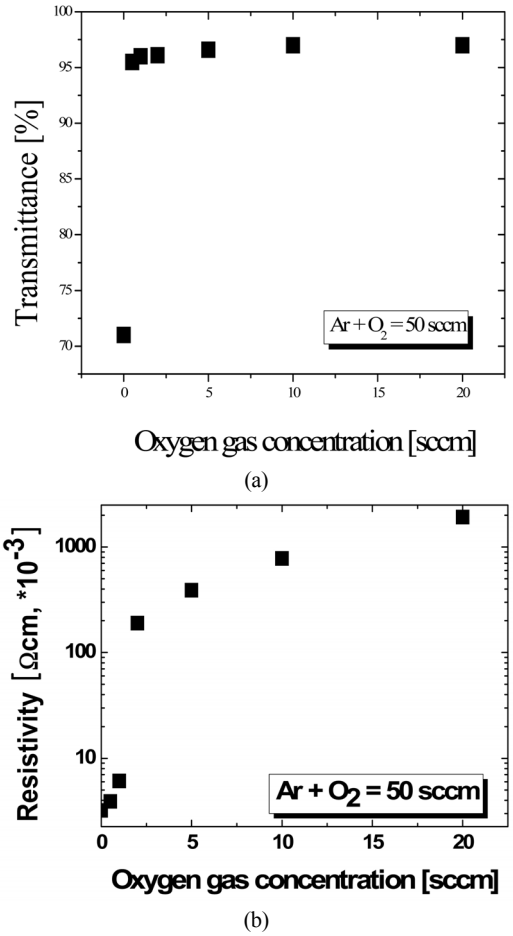
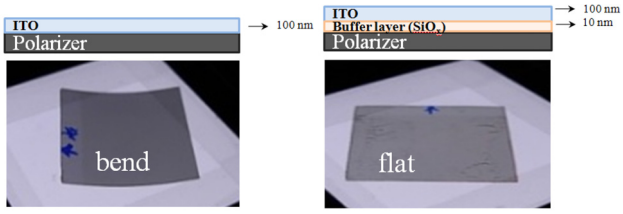


FIG. 2. Dependence of (a) transmittance and (b) resistivity of an ITO-deposited polarizer on the concentration of the oxygen gas.



(a) (b)

FIG. 3. (a) Bending in an ITO-deposited polarizer and (b) an ITO-deposited polarizer with a buffer layer.

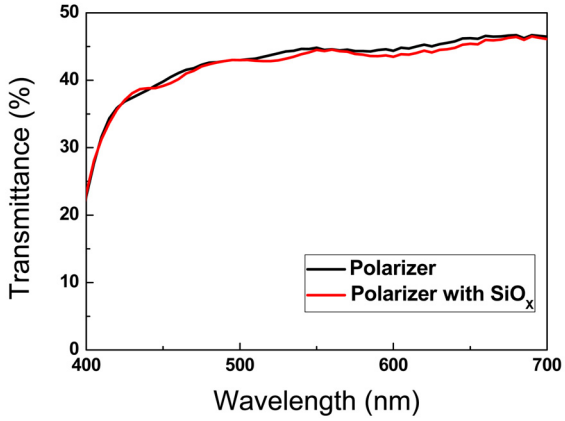


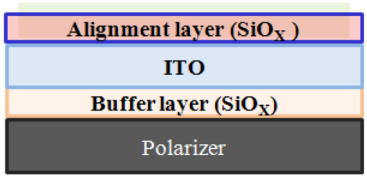
FIG. 4. Transmission spectra of a polarizer before and after the deposition of SiO_X.

그러나, 액정 디스플레이는 균일한 cellgap을 유지하기 위하여 기판의 편평도가 요구되는데, 위의 조건으로 편광판에 ITO만을 증착하였을 경우, 그림 3(a)와 같이 기판의 휨 현상이 발생하였다. 이에, ITO 층의 경도를 강화하기 위하여 강한 경도를 가진 SiO_X를 편광판 위에 증착한 뒤 ITO 층을 증착하였다[10]. 저온(40℃)에서 sputtering으로 높은 투과율과 높은 비저항을 확보하며 buffer 층을 증착하기 위하여 산소 대 아르곤 가스 비를 40 : 10으로 초기진공 10^{-6} torr, 작업진공 10^{-2} torr를 사용하였고. RF magnetron sputter의 power를 80 W에서 10 nm 두께로 증착하여 그림 3(b)와 같이 기판의 휨 현상을 제거하였다.

Buffer 층을 증착하여 휨 현상을 제거할 때, 투과율의 감소가 없어야 하므로, buffer layer 증착 전 후의 투과율을 비교하여 보았다. 그림 4의 파장별 투과율 특성을 보면 buffer 층을 증착하였을 때, 증착하지 않은 편광필름의 투과율 대비 약 98%이상의 고 투과율을 확보함으로써 투과율의 감소없이 휨 현상을 개선할 수 있었다.

Buffer 층위에 ITO 층을 높은 투과율과 낮은 비저항을 가지도록 산소 대 아르곤 가스 비를 49:1로 초기진공 10^{-6} torr, 작업진공 10^{-2} torr, RF magnetron sputter의 power를 60 W에서 100 nm 두께로 증착하여 비저항 2.46×10-3 Ωcm의 ITO 층을 얻을 수 있었다.

이렇게 제작된 편광판 기판으로 실제 액정 디스플레이를



	Buffer layer	ITO	Alignment layer
초기진동 (Torr)	10^{-6} Torr	10^{-6} Torr	10^{-6} Torr
작업진공 (Torr)	10^{-2}	10^{-2} Torr	10^{-2} Torr
가스	Ar, O_2	Ar, O_2	Ar, O_2
농도 (sccm)	Ar:O_2 =40:10	Ar:O_2 =49:1	Ar:O_2 =40:10
Power (W)	80	60	80
박막두께 (nm)	10	100	100

FIG. 5. Configuration of the proposed polarizer substrate and the deposition condition.

제작하기 위해서는 액정의 방향성을 부여하기 위해 배향막을 형성해야 하는데, 보편적으로 쓰이는 배향방법인 Polyimide를 이용한 유기막 배향은 배향막 형성을 위해 고온의 baking 공정을 거쳐야 하므로 편광판 기판에 적용하기에 적합하지 않다. 이에 우리는 저온에서 배향막 형성이 가능한 무기 배향막을 이용하고 액정의 배열은 이온빔 공정을 이용하였다. 이온빔 배향은 수평배향과 수직배향이 모두 가능하며[13-16], 이온빔 배향을 위한 alignment layer는 SiO_X 무기 배향막을 이용하였다. 액정의 수평배향을 위한 무기 배향막의 증착조건은 40 ℃의 저온에서 초기진공 10^{-6} torr, 작업진공 10^{-2} torr를 사용하였고, 아르곤 가스와 산소 가스를 40:10 비율로 혼합하여 50 sccm이 되도록 하였다. RF magnetron sputter의 power를 80 W로 설정한 후 SiO_X 층의 두께가 100 nm가 되도록 증착하였다. 무기 배향막 증착 후 이온빔 조사를 통해 액정을 수평배향하였다. 액정의 수평배열을 위한 이온빔 조사조건은 초기진공 2×10^{-6} torr, 작업진공 10^{-4} torr에서 아르곤 가스를 5 sccm 농도로 혼합한 후 SiO_X 층에 300~600 eV 의 에너지로 30~60초 가량 이온빔을 조사하였다.

이로써 그림 5와 같이 유리 기판을 대체할 수 있는 편광판 기판을 제작할 수 있었다. 첫 번째 SiO_X 층은 편광필름의 휘어짐 방지를 위한 buffer 층으로 활용되었고, 두 번째 층은 액정에 전계인가를 위한 투명 전극층, 세 번째 층은 액정의 배향을 위한 배향막으로 활용되었다. Buffer 층을 위한 무기막 층은 액정배향을 위한 무기막 층(60 ~100 nm)보다 상대적으로 얇은 두께(10 ~ 60 nm)에서도 활용될 수 있었다. 이는 실제 편광필름기판 제조 시 필요한 추가시간이 길지 않고 배향막으로 사용하는 무기 배향막과 같은 물질을 사용함으로써 공정의 복잡도 또한 크게 증가하지 않는다는 장점을 가지고 있다.

III. 실험결과

편광판 기판을 적용한 실제 액정 셀의 전기광학특성을 확인하기 위하여 위와 같이 제작된 편광판 기판을 이용하여 기

본적인 TN (twisted-nematic) 액정 셀과 ECB (electrically controlled birefringence) 액정 셀을 각각 제작해보았다. TN 모드 액정 셀은 앞의 조건으로 제작된 두 장의 편광판 기판을 6 μm로 cell gap을 형성시켜 ML-0223(Δn: 0.0809, Merck)을 주입하여, 90° twist된 NW(normally white)으로 제작하였고, ECB 모드 액정 셀은 제작된 두 장의 편광판 기판을 이온빔으로 anti-parallel하게 수평배향을 하고 4.25 μm로 cell gap을 형성시켜 ML-0223(Δn: 0.0809, Merck)을 주입하여 NW로 제작하였다.

그림 6의 제작된 TN 액정 셀, ECB 액정 셀의 V-T curve를 살펴보면 TN 액정 셀의 최대 투과율은 31.6%, 구동전압 2.5 V에서 dark가 되고, ECB 액정 셀의 최대투과율은 26.6%, 구동전압 5.7 V에서 dark가 되었다. 기존의 유리기판을 사용한 액정셀과 비교하여 0.5 V 미만의 구동전압차이를 나태내었으며 투과율의 경우에는 약 1% 향상될 수 있으므로 제안한 소자의 전기광학특성은 기존 액정셀과 유사하며, 두께는 획기적으로 줄일 수 있음을 확인할 수 있다. 그림 7에서 제작된 액정 셀의 응답특성을 살펴보면 TN의 경우 3 V에서 turn-on시 5.4 ms, turn-off시 21.7 ms, ECB의 경우, 5 V에서 turn-on시 3.6 ms, turn-off시 16.2 ms의 응답특성을 확인할 수 있었다. 구동전압은 ITO 층의 증착 두께와 조건에 따라 비저항이 달라지므로 증착조건을 달리하면 구동전압을 더 낮은 전압으로도 조절 가능하다. 응답속도의 경우도 polymer-network, polymer-wall을 적용하여 고속응답특성을 가지는 편광판 기판 액정 디스플레이를 제작할 수 있을 것이다[17-22].

그림 8과 같이 2×2 cm^2의 동일한 크기로 유리 기판과 제안된 편광판 기판을 비교할 경우, 유리 기판은 두께 700 μm, 무게 1.2 g 인 것에 비해 제안된 ITO가 증착된 편광판 기판은 두께 200 μm, 무게 0.26 g으로 편광판 기판을 적용하여 기존 액정 디스플레이의 두께를 70% 절감하고, 무게도 80% 절감하여 경량박형의 액정 셀을 제작할 수 있었다. 그림 8 (c)와 같이 기존의 유리기판을 사용한 액정셀과 비교하여 전체면적에 대해 동일한 투과율을 확보할 수 있으므로 셀갭 균일성도 확보될 수 있음을 확인할 수 있다. 실제 TFT 액정 디스플레이 패널 제작시에는 TFT 공정을 위해 300℃ 이상의 고온과정이 요구되므로 buffer 층만으로 편광판의 휘어짐이나 손상방지가 어렵다. 따라서, 실제 패널 적용 시에는 저온 TFT 공정에 대한 연구가 병행되어야 한다. 현재 플라스틱 기판을 사용하는 플렉서블 디스플레이에 적용하기 위해 저온공정에 대한 연구가 활발히 진행되고 있어 향후 적용이 가능할 것으로 사료된다. 또한, TFT가 필요 없는 passive

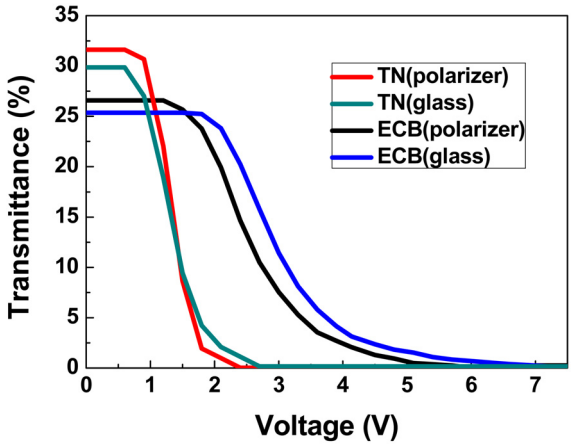


FIG. 6. Measured V-T curves of a TN cell and an ECB cell with polarizer substrates.

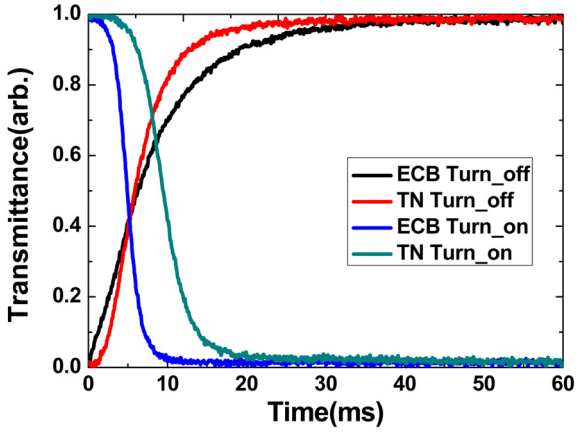


FIG. 7. Measured temporal response of a TN cell and an ECB cell with polarizer substrates. We applied 3 V to the TN cell and 5 V to the ECB cell.

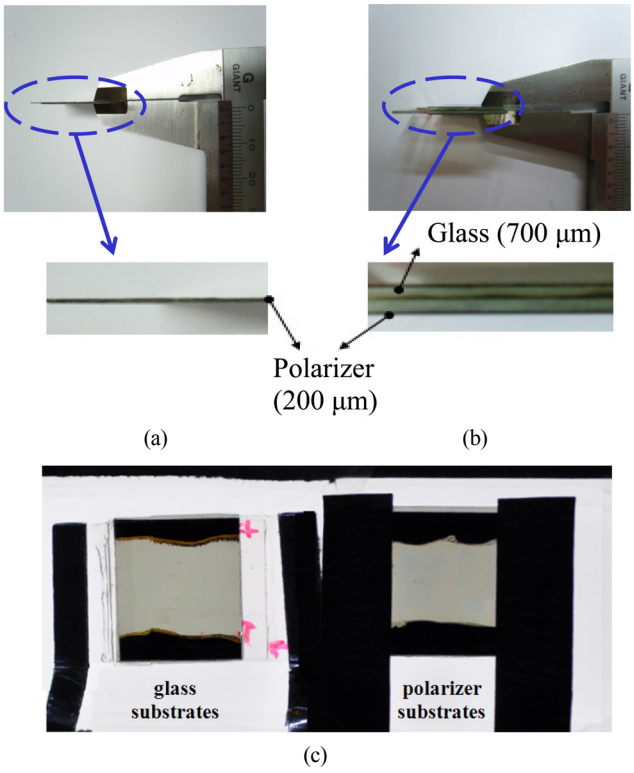


FIG. 8. Cross section images of LC cells (a) using glass substrates and (b) using polarizer substrates and (c) top view images.

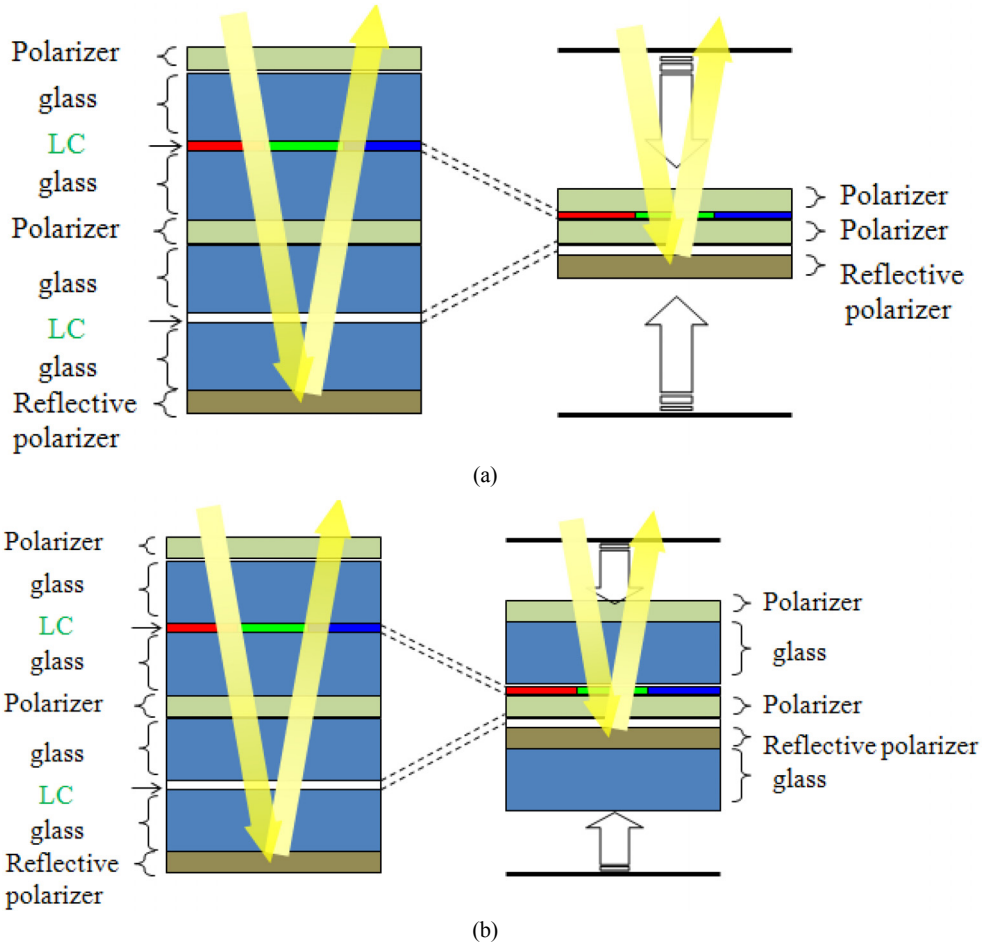


FIG. 9. Configuration of a transflective LCD without pixel division using glass substrates only are compared with (a) polarizer substrates only and (b) polarizer substrate and glass substrate mixed.

matrix 방식에는 바로 적용가능 하리라 기대한다.

제안한 편광판 기판은 마스크를 이용하여 패턴 전극을 형성시킬 수도 있고, 편광판의 양면에 전극을 형성시켜 두 층의 panel을 사용하는 전반사전투과 액정소자[1, 2]나 3D 디스플레이[3]에 적용할 수도 있으며, in-cell 구조[23, 24] 등 다양한 형태로 적용 가능할 것이다. 그 예로, 최근 각광받고 있는 전반사전투과 액정 디스플레이에 편광판 기판을 적용한다면, 그림 9(a)와 같이 4장의 유리 기판과 3장의 편광필름을 사용하는 전반사전투과 액정 디스플레이에서 4장의 유리 기판을 양면에 전극이 형성된 편광판 기판 1장과 단면에 전극이 형성된 편광판 기판 2장을 이용하면 4장의 유리를 제거할 수 있으며, 위 구조에 그림 9(b)와 같이 상하부에 유리를 적용하여도 2장의 유리 기판을 제거할 수 있어 parallax[4, 5]도 개선하고, 내구성도 높은 소자를 제작할 수 있다.

IV. 결 론

저온에서 투명전극을 증착한 편광판 기판에 이온빔을 이용하여 배향한 뒤 액정 디스플레이를 제작하였다. 제작된 소자의 전기광학특성을 측정하여 액정 디스플레이로 구동 가능한 초경량, 박형 액정 디스플레이를 구현할 수 있음을 확인하였다. 편광판 기판에 패턴 전극 등 다양한 형태의 전극을 증착함으로써, 모바일 디스플레이 등 다양한 액정 디스플레이에 경량박형 기판으로 광범위하게 적용가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

This work was supported by Mid-career Researcher Program through NRF grant funded by the MEST (2011-0000085).

References

1. K. Tsuda, Japan Patent 2004069835 (2004).
2. K.-H. Kim, H.-J. Jin, B.-H. Cheong, H.-Y. Choi, S.-T. Shin, J. C. Kim, and T.-H. Yoon, “Optical configurations for nematic liquid crystal device switchable between reflective and transmissive modes,” Appl. Opt. **49**, 4774-4779 (2010).
3. H. K. Shin, J. H. Lee, H.-J. Jin, T.-H. Yoon, and J. C.

Kim, "Stereoscopic three-dimensional display based on polarization-switching device with low cross talk and high contrast ratio," Opt. Lett. **35**, 2227-2229 (2010).
4. S. T. Wu and D.-K. Yang, *Reflective Liquid Crystal Displays* (Wiley, New York, USA, 2001).
5. T. Maeda, T. Matsushima, E. Okamoto, H. Wada, O. Okumura, and S. Iino, "Reflective and transflective color LCDs with double polarizers," J. Soc. Inf. Display **7**, 9-15 (1999).
6. K.-H. Kim, H.-J. Jin, K.-H. Park, J.-H. Lee, J. C. Kim, and T.-H. Yoon, "Long-pitch cholesteric liquid crystal cell for switchable achromatic reflection," Opt. Express **18**, 16745-16750 (2010).
7. K.-H. Kim, H.-J. Jin, B.-H. Cheong, H.-Y. Choi, S. T. Shin, J. C. Kim, and T.-H. Yoon, "Optical configurations for nematic liquid crystal device switchable between reflective and transmissive modes," Appl. Opt. **49**, 4774-4779 (2010).
8. H. Totsuka, I. Sato, and M. Anma, "Suppression of haze formation on LCD glass and durability of the substrate etched by BHF," SID Int. Symp. Digest Tech. Pap. 164-167 (2000).
9. A. Grosse, M. Grewe, and H. Fouckhardt, "Deep wet etching of fused silica glass for hollow capillary optical leaky waveguides in micro fluidic devices," J. Micromech. Microeng. **11**, 257-262 (2001).
10. X. W. Sun, L. D. Wang, and H. S. Kwok, "Improved ITO thin films with a thin ZnO buffer layer by sputtering," Thin Solid Films **360**, 75-81 (2000).
11. D. Kim, Y. Han, J.-S. Cho, and S.-K. Koh, "Low temperature deposition of ITO thin films by ion beam sputtering," Thin Solid Films **377-378**, 81-86 (2000).
12. T. C. Gorjanc, D. Leong, C. Py, and D. Roth, "Room temperature deposition of ITO using r.f. magnetron sputtering," Thin Solid Films **413**, 181-185 (2002).
13. J. L. West, L. Su, K. Artyushkova, J. Farrar, and J. E. Fulghum, "Study of ion beam alignment of liquid crystals on polymer substrates," SID Int. Symp. Digest Tech. Pap. 1102 (2002).
14. J. P. Doyle, P. Chaudhari, J. L. Lacey, E. A. Galligan, S. C. Lien, A. C. Callegari, N. D. Lang, M. Lu, Y. Nakagawa, H. Nakano, N. Okazaki, S. Odahara, Y. Katoh, Y. Saitoh, K. Sakai, H. Satoh, and Y. Shiota, "Ion beam alignment for liquid crystal display fabrication," Phys. Res. B **206**, 467-471 (2003).
15. P. K. Son, J. H. Seo, J. C. Kim, and T.-H. Yoon, "Ion beam alignment of liquid crystal on amorphous SiO_X film," Mol. Cryst. Liq. Cryst. **475**, 65-72 (2007).
16. P. K. Son, J. H. Park, J. C. Kim, and T.-H. Yoon, "Control of liquid crystal alignment by deposition of silicon oxide thin film," Thin Solid Film **515**, 3102-3106 (2007).
17. Y.-H. Fan, Y.-H. Lin, H. Ren, S. Gauza, and S.-T. Wu, "Fast-response polymer network liquid crystals for optical communications," SID Int. Symp. Digest Tech. Pap. **35**, 1526-1529 (2004).
18. S. R. Lee, J.-H. Shin, J.-I. Baek, M.-C. Oh, T.-H. Yoon, and J. C. Kim, "Initially π-twisted nematic liquid crystal cell stabilized by a fluorinated polymer wall," Appl. Phys. Lett. **90**, 163513-1~163513-3 (2007).
19. C. Y. Huang, R. X. Fung, Y. G. Lin, and C. T. Hsieh, "Fast switching of polymer-stabilized liquid crystal pi cells," Appl. Phys. Lett. **90**, 171918 (2007).
20. J.-I. Baek, K.-H. Kim, J. C. Kim, T.-H. Yoon, H. S. Woo, S. T. Shin, and J. H. Souk, "Fast switching of vertical alignment liquid crystal cells with liquid crystalline polymer networks," Jpn. J. Appl. Phys. **48**, 056507-1~056507-5 (2009).
21. H.-J. Jin, K.-H. Kim, J.-I. Baek, J. C. Kim, and T.-H. Yoon, "Fast switching of a polymer-networked twisted nematic liquid crystal cell," Korean J. Opt. Photon. (Hankook Kwanghak Hoeji) **21**, 69-73 (2010).
22. D. H. Song, S. R. Lee, T.-H. Yoon, and J. C. Kim, "Multi-dimensional liquid crystal alignment effect of polymer wall on vertically aligned liquid crystal cell," Jpn. J. Appl. Phys. **49**, 011702-1~011702-4 (2010).
23. H. Imayama, J. Tanno, K. Igeta, M. Morimoto, S. Komura, and T. Nagata, "Novel pixel design for a transflective IPS LCD with an in-cell retarder," SID Int. Symp. Digest Tech. Pap. **38**, 1651-1654 (2007).
24. W. Lee, W. Choi, Y.-W. Lim, Y.-J. Na, and S.-D. Lee, "A highly efficient organic light-emitting diode with an imprinted in-cell polarizer for backlight applications," J. Inf. Display **9**, 11-14 (2008).