

## 측면시야각에서의 대칭적 명암대비비 향상을 위한 IPS-LCD 광학보상

김태현, 김봉식, 박우상<sup>a</sup>

인하대학교 전자공학과

### Optical Compensation of IPS-LCD for Symmetric-High-Contrast at Off-Axis Oblique View

Tae-Hyeon Kim, Bong-Sik Kim, and Woo-Sang Park<sup>a</sup>

Department of Electronic Engineering, Inha University, Inha-ro 100, Nam-gu, Incheon 22212, Korea

(Received February 23, 2016; Accepted February 24, 2016)

**Abstract:** In this study, we proposed an optical compensation method to improve the symmetricity of contrast ratio for wide viewing angle IPS (in-plane switching) LCD. First, the phase retardation depending on the thickness of compensation film is calculated, and then the phase change is presented at the Poincaré sphere. The phase retardation and the polarization state of the light passing through the optical elements are calculated by using the EJMM (extended Jones matrix method). In addition, the transmittance and the contrast countour are also calculated by using the Berreman's 4x4 matrix method. The simulation is carried out for a IPS LC cell with positive A/C/A compensation film. From the standard deviation of the contrast ratio, we confirmed the symmetricity at each viewing angle is inversely proportional to the standard deviation and calculated the optimum design condition of the uniaxial compensation film for the IPS LCD.

**Keywords:** Liquid crystal display, In-plane switching, Viewing angle, Contrast ratio, Compensation film

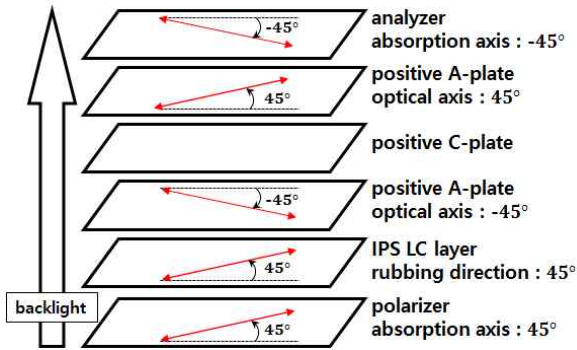
#### 1. 서 론

LCD (liquid crystal display) 제품은 현재 스마트폰, 티비, 컴퓨터, 태블릿 PC, 자동차 디스플레이 등 많은 영역에서 사용되고 있으며, 고사양의 LCD가 요구되고 있다. 고품질의 LCD는 액정의 거동 특성에 따라 VA (vertically aligned)와 IPS (in-plane switching) 모드로 구분할 수 있으며, IPS 모드는 시야각 특성 면에

서 뛰어난 성능을 갖고 있다 [1-3]. 수평배열 되어있는 액정이 전압 인가 시, 면 내에서 회전하는 형태로 거동하여, 액정층을 투과하는 빛이 겪는 복굴절을 최소화할 수 있도록 조절이 가능하기 때문이다.

하지만 측면 시야각에서의 명암 대비비는 편광판의 이등분선에서 누설되는 빛의 정도가 다른 부분에 비해 상대적으로 크기 때문에, 수직시야각에 비하여 현저하게 낮은 특성을 갖는다 [4]. 이러한 빛샘 현상을 감소시키기 위한 다양한 연구, 개발이 이루어 졌으며, 일축성 필름을 이용한 보상방법이 상대적으로 설계가 용이하고 저렴한 비용으로 인하여 많이 사용되고 있다 [5,6]. 일축성 필름을 이용한 광시야각 구현에는 필름을 조합하는 여러 방법이 있으며, 대칭적 시야각 특성을

<sup>a</sup> Corresponding author; [wspark@inha.ac.kr](mailto:wspark@inha.ac.kr)



**Fig. 1.** Optical configuration of the IPS LCD with the positive A/C/A compensation film.

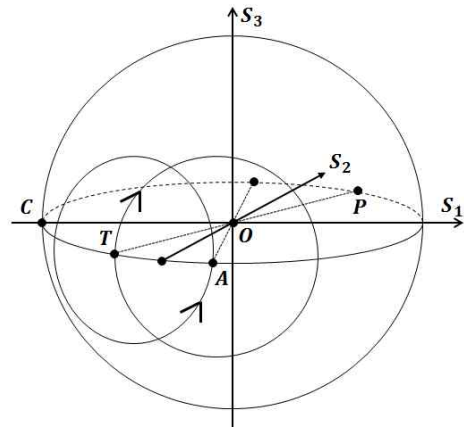
위하여 그림 1과 같이 양의 A-plate, C-plate, A-plate 순으로 조합하여 사용하는 것이 보편적이다 [7,8].

본 논문에서는 대칭적 시야각 구현을 위한 양의 A/C/A-plate 보상방법에서 각각의 보상필름들의 두께에 따른 시야각 별 명암대비비의 대칭성을 계산하고, 결과를 바탕으로 최적의 필름두께를 확인하였다. 필름 두께와 시야각에 따른 각 층의 위상지연 변화는 EJMM (extended Jones matrix method)을 이용하여 계산하였고 [9,10], 각 광학매질의 투과한 빛의 편광상태 변화를 푸앵카레 구에 나타내었다 [11]. 마지막으로, 빛의 투과특성을 Berreman's 4×4 matrix method를 이용하여 계산하고 [12], 시야각 전체 명암대비비의 표준편차를 바탕으로 필름두께에 따른 명암대비비의 시야각 대칭성을 정량적 수치로 나타내었다. 그 결과를 바탕으로 IPS 모드 LCD의 보상 필름의 최적화를 수행하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 광학적 보상 방법

빛이 일축성 필름을 지날 때 빛의 편광상태 변화는, 필름의 광축을 축으로 위상지연 값만큼 푸앵카레 구를 회전하는 것으로 표현할 수 있다. 필름을 투과하는 빛의 위상지연 정도는 필름의 두께에 비례하므로 두께를 적절하게 설계하여, 광학소자들을 통과한 빛의 최종 편광상태를 검광자의 광축에 해당하는 편광상태의 위치로 푸앵카레 구를 이용하여 회전시킴으로써, 측면시야각 특성을 향상시킬 수 있다 [13].



**Fig. 2.** Polarization state change of the light passing through the crossed polarizers at the Poincaré sphere.

측면 시야각은, IPS모드의 편광자와 검광자의 사이의 각을 이등분 하는 지점에서 누설되는 빛으로 인한 명암대비비의 감소를 보상하기 위하여, 경사각  $\theta_i = 70^\circ$ , 방위각  $\phi_i = 270^\circ$ 에서 해석하였으며, 편광자와 검광자의 광축이 각각  $45^\circ, -45^\circ$ 인 경우에 대하여 계산하였다. 빛의 수직입사 시, 푸앵카레 구 상에서 편광자를 투과한 빛의 편광상태가 검광자의 광축과 일치할 경우, 빛은 통과하지 못하게 되지만, 입사각이  $\theta_i = 70^\circ, \phi_i = 270^\circ$ 인 경우, 편광자와 검광자의 광축은 더 이상 직교하지 않으므로, 편광자를 투과한 빛의 편광상태와 검광자의 광축이 일치하지 않고, 누설되는 빛이 존재한다.

$\phi_i = 270^\circ$ 에서 변화한 편광자와 검광자의 각도는 아래와 같이 계산된다 [14].

$$\phi = \cos^{-1} \left( \frac{\frac{\sin^2 \theta_i}{n_p^2}}{2 - \frac{\sin^2 \theta_i}{n_p^2}} \right) \quad (1)$$

식 (1)의  $\theta_i$ 는 시야각의 경사각,  $n_p$ 는 편광자와 검광자의 굴절률을 의미한다. 입사광의 입사각이  $\theta_i$ 만큼 기울어진 경우, 푸앵카레 구면 상에서 편광자의 광축과 검광자의 광축 사이의 각도는  $2\phi$ 가 되며, 편광자 투과축을 의미하는 점 **T**와 검광자의 광축을 의미하는 점 **A**는 그림 2와 같이 표현된다.

편광자를 투과한 빛의 편광상태는 그림 2의 점 **T**와

같이 되며, 액정층을 투과한 빛은 액정이 수평으로 고르게 배열되어 있는 IPS모드의 특성으로 인하여, 액정의 rubbing 방향을 광축으로 갖는 일축성 필름을 투과한 것과 동일하게 해석할 수 있고, 편광자의 광축과 액정의 rubbing 방향이 평행하기 때문에 액정층까지 투과한 빛의 편광상태 또한 점 **T**가 된다. 최종적으로, 빛의 편광상태는 검광자의 광축 점 **A**로 이동시켜야 하므로, 액정층과 검광자 사이에 양의 A/C/A-plate를 배치하여 편광상태를 변경시킨다.

첫 번째 양의 A-plate의 광축의 방위각은  $-45^\circ$ 로 검광자의 광축과 동일하기 때문에 위상지연으로 인한 푸앵카레 구에서의 점 **T**의 회전은 검광자의 광축을 축으로 삼으며, 양의 A-plate 이므로 점의 회전 방향은 시계방향이다. 필름의 두께 변화에 따라 위상지연이  $2\pi$ 인 경우의 편광상태 변화 궤적을 그림 2의 점 **A**를 원점으로 하는 원으로 표현하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 위상지연이  $2\pi$ 가 되면 푸앵카레 구면에서 궤적이 원이므로, 점 **T**의 편광상태는 변하지 않는다. 필름의 두께에 따른 A-plate의 위상지연은 다음의 식으로 계산된다 [15].

$$\Gamma_A = \frac{2\pi d}{\lambda} n_c \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_i \sin^2(\phi_n - \phi_i)}{n_c^2} - \frac{\sin^2 \theta_i \cos^2(\phi_n - \phi_i)}{n_o^2}} - \frac{2\pi d}{\lambda} n_o \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_i}{n_o^2}} \quad (2)$$

식 (2)의  $n_o$ ,  $n_c$ 는 필름의 정상광선의 굴절률, 비정상광선의 굴절률,  $\phi_n$ 은 필름의 광축의 방위각,  $d$ 는 필름의 두께를 의미한다. 푸앵카레 구면 상에서 회전하고자 하는 각도와 위상지연 값이 동일하므로, 식 (2)를 이용하여 필름의 두께를 계산할 수 있다.

두 번째 보상필름인 양의 C-plate는 광축의 방위각이  $0^\circ$ 이고, 경사각이  $90^\circ$ 인 일축성 필름이다. 따라서 C-plate의 위상지연으로 인한 푸앵카레 구면 상에서의 회전축은 그림 2의  $\overline{CO}$ 와 같다. 양의 C-plate 이므로, 위의 양의 A-plate와 동일하게 편광상태를 시계방향으로 회전시킨다. C-plate의 위상지연은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Gamma_C = \frac{2\pi d}{\lambda} n_o \left( \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_i}{n_c^2}} - \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_i}{n_o^2}} \right) \quad (3)$$

이 때, C-plate의 두께, 즉, 위상지연의 크기는 첫 번째 A-plate의 위상지연에 의존한다. 세 번째 양의

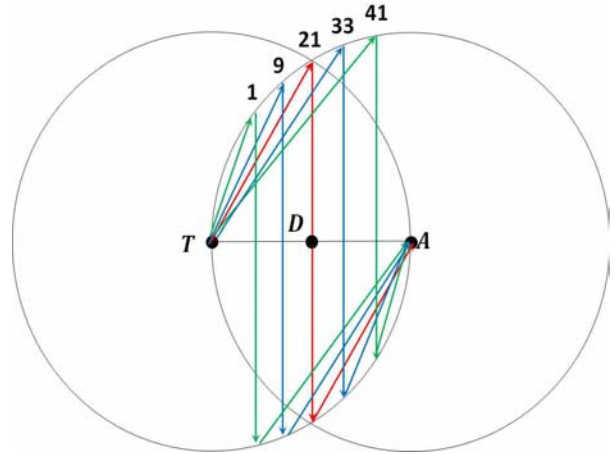


Fig. 3. Compensation routes of positive A/C/A films by thickness of films.

A-plate의 광축은 방위각이 편광자의 광축과 동일한  $45^\circ$ 이기 때문에 세 번째 양의 A-plate의 위상지연으로 인한 회전은 그림 2의  $\overline{PO}$ 축을 기준으로 하여 시계방향으로 이루어진다. 따라서  $\overline{TO}$ 축을 기준으로 할 때에는 시계 반대 방향이고 점 **T**를 원점으로 하는 원을 따라 편광상태가 변화한다. 결국, 검광자 바로 전의 세 번째 양의 A-plate의 위상지연으로 인한 회전에 의해 검광자 광축의 점 **A**로 이동하여야 하므로, C-plate의 위상지연은 푸앵카레 구면 상에서  $\overline{TA}$ 를 반지름으로 하고 점 **T**를 원점으로 하는 원 위에 편광상태가 위치하도록 하는 값이어야 한다.

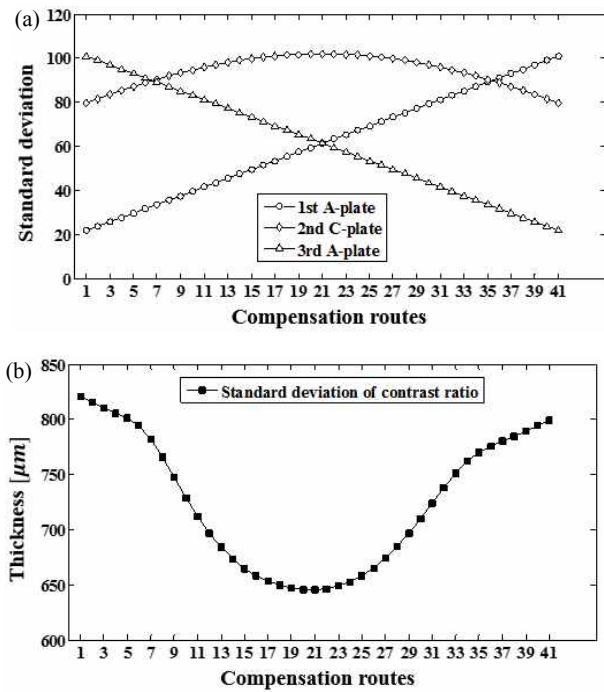
결과적으로 첫 번째 양의 A-plate의 두께를 정하면, 나머지 C-plate, A-plate의 두께는 첫 번째 필름의 두께에 의존적이므로 각각의 두께 값이 정해지고, 두께별 푸앵카레 구면 상의 편광상태 변화 경로에 따른 여러 가지 경우를 비교할 수 있게 된다.

### 3. 결과 및 고찰

표 1은 시뮬레이션에 사용된 각 광학매질의 설계 파라미터들을 나타낸다. 그림 3과 같이 푸앵카레 구면 상에서 편광자의 투과축의 점 **T**와 검광자의 광축의 점 **A**로의 편광상태 변화 경로를 필름 두께 별로 나타내었다. 본 논문에서는 점 **T**와 점 **A**의 가운데 대원이 지나가는 점 **D**를 기준으로 좌우 20개씩 총 41개의 경로로 나누어 비교하였다.

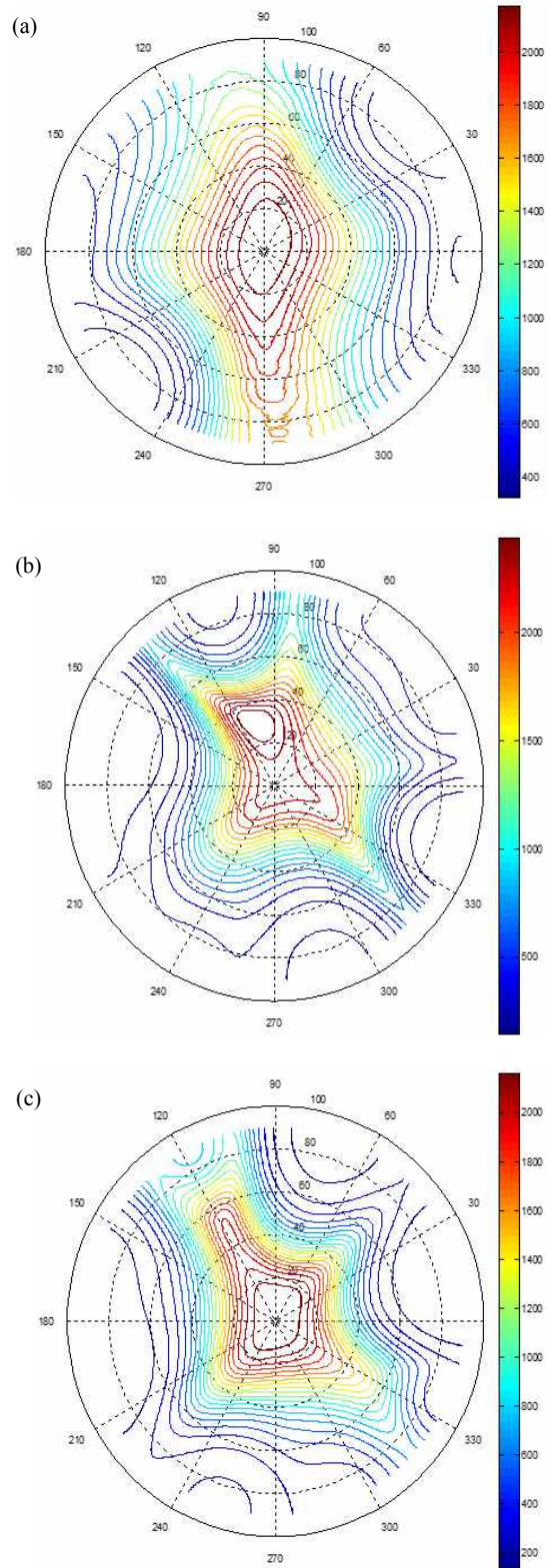
**Table 1.** Parameters used in simulating the IPS-LCD with the positive A/C/A compensation film.

Parameters	Values
IPS LC cell gap	4 $\mu\text{m}$
$n_e$ of LC material	1.5649
$n_o$ of LC material	1.4793
$n_e$ of polarizer	1.5+0.0022 <i>i</i>
$n_o$ of polarizer	1.5+0.000032 <i>i</i>
$n_e$ of film	1.5110
$n_o$ of film	1.5095
Wavelength of incident light	550nm



**Fig. 4.** (a) Thickness of each films and (b) standard deviation by the compensation routes.

그림 4(a)는 각 위상변화 경로에 해당하는 필름의 두께를 의미한다. 필름 두께는 그림 3에서 점 **T**와 점 **A**의 가운데 대원을 지나는 경로를 기준으로 첫 번째 A-plate를 얇게 하거나(20번 이하의 경우), 두껍게 (22번 이상의 경우) 설계하였기 때문에 두 번째 필름인 양의 C-plate의 두께 값이 21번 경우를 기준으로 대칭적임을 볼 수 있다. 첫 번째, 세 번째 필름인 양의 A-plate의 두께 또한 점 **D**를 기준으로 양 옆의 경우가 동일한 두께임을 확인할 수 있고, 기준이 되는 점 **D**를



**Fig. 5.** Iso-contrast contours of (a) 21st case, (b) 1st case, (c) 41st compensation route.

지나는 경로의 두 개의 A-plate의 두께는 동일함을 확인할 수 있다. 디스플레이의 대칭적 시야를 확인하기 위하여 필름두께 별 41개의 경로의 명암대비비를 구한 후, 경사각  $0^\circ$  부터  $90^\circ$ , 방위각  $0^\circ$  부터  $360^\circ$  까지의 명암대비비 값의 표준편차를 구하였다. 표준편차가 클수록 시야각 별 명암대비비 차이가 크다는 의미이므로 대칭적이지 않다고 볼 수 있다.

그림 4(b)는 각 경로 별 명암대비비의 표준편차를 나타낸 것이다. 편광상태 변화 경로가 점 **D**를 지나는 경로와 가까울수록 표준편차가 작음을 확인할 수 있으며, 이는 시야각별 명암대비비가 대칭적임을 알 수 있다. 표준편차가 가장 낮은 값은 645.68이며, 그림 3에서 점 **D**를 지나고 있는 21번 경로에 해당한다. 이 때의 첫 번째 A-plate와 세 번째 A-plate의 두께는 모두  $61.38 \mu\text{m}$ 로 동일하고, 두 번째 C-plate의 두께는  $101.92 \mu\text{m}$ 이다.

그림 5(a)는 21번 경로, (b)는 1번 경로, (c)는 41번 경로를 갖는 보상필름 각각에 대한 시야각별 명암대비비를 나타낸다.

가장 큰 표준편차를 갖는 경우는 1번 경로의 경우이며, 그 값은 821.30이다. 이 때, 첫 번째 A-plate의 두께는  $21.83 \mu\text{m}$ , 두 번째 C-plate는  $79.65 \mu\text{m}$ , 세 번째 A-plate는  $100.93 \mu\text{m}$ 이다. 그림 5(a)에 나타낸, 1번 경로는 C-plate의 위상지연으로 인한 편광상태의 회전 궤도가 표준편차 값이 가장 낮은 21번 경우로부터 편광자의 투과축 방향으로 가장 멀리 위치한다. 41번의 경우는 반대 방향인 검광자의 광축 방향으로 1번의 경우와 동일한 거리만큼 위치하여 있지만, 검광자의 광축과 근접한 경로로 편광상태가 변화하기 때문에 그림 5(b)보다 5(c)에서 명암대비비가 더 대칭적임을 확인할 수 있다. 표준편차가 가장 낮은 그림 5(a)의 21번 경로의 경우, 수직시야각 부근에서 명암대비비는 5(b)와 5(c)에 비해 다소 낮은 값을 갖지만, 전체적으로 높고 대칭적인 명암대비비를 갖는 것을 볼 수 있다. 따라서 시야각 별 명암대비비의 표준편차가 가장 낮은 21번 경우의 보상필름 설계 방법을 이용하여 대칭적인 명암대비비 갖는, 필름의 최적화가 가능하다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 LCD의 측면 시야각의 명암대비비를 일축성 필름을 이용하여 보상하는 기존의 양의 A/C/A-plate 조합 방법에서 시야각 별 대칭적 명암대

비비를 얻기 위한 설계 방법을 제시하였다. 편광자 위에 기본적인 IPS모드의 LCD를 배치하고, 입사광이 액정층과 검광자 사이에서 보상 필름을 겪도록 시뮬레이션을 수행하였다.

푸앵카레 구면 상에 빛의 편광상태를 표현하기 위하여 EJMM을 이용하였고, 측면 시야각에서 광축과 빛의 편광상태가 일치하기 위해서는 필름의 위상지연이 회전 각도와 일치하여야한다는 특성을 이용하여 각 필름의 두께를 계산하였다. 마지막으로, 각 소자들의 광투과 특성을 Berreman's  $4 \times 4$  matrix method를 이용하여 계산 후, 보상필름의 두께 별 명암대비비를 구하였다. 명암대비비 대칭성의 정량적 수치화를 위하여 명암대비비의 표준편차를 구하고, 그 값을 바탕으로 IPS 모드 LCD 시야각 특성 보상을 위한 필름의 최적설계 수치를 계산하였다. 결과적으로, 대칭적 명암대비비를 얻기 위해서는 표준편차가 가장 낮도록 편광상태 변화 경로를 택해야 하며, 이는 편광자의 투과축의 점과 검광자의 광축의 점 중앙을 지나는 경로임을 확인하였다.

본 논문에서 제안된 방법을 이용하여, 넓은 시야각에서 대칭적이고 균일한 명암대비비를 갖는 LCD의 일축성 보상필름의 최적 설계가 가능할 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 경제 협력권 산업 육성 사업인 디스플레이 및 신재생 에너지 커버글라스 표면 코팅용 고기능성 불소/실리콘 소재 개발 사업단의 연구비 지원(A012100115)으로 수행되었습니다.

#### REFERENCES

- [1] R. A. Soref, *J. Appl. Phys.*, **45**, 5466 (1974). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1663263>]
- [2] M. Oh-E, M. Ohta, S. Aratani, and K. Kondo, *Proc. 15th Int. Display Research Conf. (Asia Display, 1995)*, p. 577.
- [3] M. Oh-E and K. Kondo, *Appl. Phys. Lett.*, **67**, 3895 (1995). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.115309>]
- [4] R. Herke, S. Jamal, and J. Kelly, *J. Soc. Inf. Disp.*, **3**, 9 (1995). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1889/1.1984935>]
- [5] Q. Hong, T. X.Wu, X. Zhu, R. Lu, and S. -T.Wu, *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 121107 (2005). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1887815>]
- [6] X. Zhu and S.-T. Wu, *SID Int. Symp. Digest Tech.*, **36**, 1164 (2005). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1889/1.2036208>]

- [7] X. Zhu, Z. Ge, and S.-T. Wu, *J. Disp. Technol.*, **2**, 2 (2006).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JDT.2005.863599>]
- [8] Y. Saitoh, S. Kimura, K. Kusafuka, and H. Shimizu, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37**, 4822 (1998).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.37.4822>]
- [9] A. Lien, *Liq. Cryst.*, **22**, 171 (1997).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/026782997209531>]
- [10] A. Lien, *Appl. Phys. Lett.*, **57**, 2767 (1990).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.103781>]
- [11] J. E. Bigelow and R. A. Kashnow, *Appl. Opt.*, **16**, 2090 (1977). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.103781>]
- [12] D. W. Berreman, *J. Opt. Soc. Am.*, **62**, 502 (1972).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1364/JOSA.62.000502>]
- [13] K. Vermeersch, A. De Meyere, J. Fornier, and H. De Vleeschouwer, *Appl. Opt.*, **38**, 2775 (1999).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1364/AO.38.002775>]
- [14] M. G. Robinson, J. Chen, and G. D. Sharp, *Polarization Engineering for LCD Projection* (John Wiley & Sons, New York, 2005) [DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/0470871075>]
- [15] P. Yeh and C. Gu, *Optics of Liquid Crystal Displays* (John Wiley & Sons, New York, 1999), p 136.