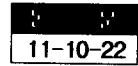


# 고분자 분산형 액정 표시소자의 전기광학적 특성 연구



## Electro-optical Properties of Polymer Dispersed Liquid Crystal Displays

박우상\*, 고영부\*, 박세근\*

(Woo-Sang Park, Young-Bu Koh, Se-Geun Park)

### Abstract

The electro-optical properties of polymer dispersed liquid crystals ( PDLCs ) depend on dispersion structures and nematic alignment which can be controlled by taking proper liquid crystal/polymer mixtures and process conditions. To achieve excellent electro-optical properties such as low driving voltage, good contrast ratio and negligible hysteresis, we have developed optimization procedure. Under the optimized conditions, PDLC of low threshold voltage less than 3.1 V, high contrast ratio more than 150 and negligible hysteresis were obtained.

**Key Words (중요 용어)** : PDLC (고분자 분산형 액정 표시소자), PNLC (고분자 네트워크형 액정 표시소자), Threshold voltage (문턱전압), Hysteresis (히스테리시스), Contrast (콘트라스트)

### 1. 서 론

고분자 분산형 액정(Polymer Dispersed Liquid Crystals ; PDLCs)은 고휘도의 투사형 디스플레이 혹은 고 콘트라스트의 반사형 표시소자에 적용할 수 있는 액정과 고분자의 복합재료로서 최근 활발히 연구되고 있다. 이 복합재료의 제작에는 microcapsule법<sup>1)</sup>, UV 혹은 열에 의한 경화법<sup>2,3)</sup> 등이 있으며 그 구조에 따라 액정이 수  $\mu\text{m}$  크기의 droplet 형태로 고분자 matrix에 분산되어 있는 것과 3차원 그물구조의 고분자가 연속상의 액정 중에 분포되어 있는 것으로 나눌 수 있다. 1985년 Fergason<sup>1)</sup>은 고분자 물질 중에 nematic 액정을

microcapsule화 한 복합재료의 전기광학적 특성을 보고함으로써 이러한 복합체가 표시소자에 적용될 수 있음을 보였으며, 1986년 Doane<sup>2)</sup>등은 액정과 고분자의 상분리 현상을 이용하여 PDLC를 제작함으로써 이에 대한 본격적인 연구가 시작되었다. PDLC는 고분자 물질에 분산된 액정 droplet이 광을 투과 혹은 산란시키는 현상을 이용한 표시소자이기 때문에 제조공정이 간단하며 편광자를 사용하지 않아 광 이용효율이 높을 뿐만 아니라 시야각 특성이 우수하다는 장점 등을 가지고 있다. 특히 PDLC를 투사형 디스플레이에 적용할 경우 밝기뿐만 아니라 편광자의 광 흡수에 의한 온도상승이 없기 때문에 기존의 TN 모드 프로젝터에 비해 냉각 시스템을 대폭 축소시킬 수 있어 이에 대한 응용이 크게 기대되고 있다. 그러나 PDLC는 높은 문턱전압으로 인하여 구동전압이 증가하고 또한 전기광학적 특성에 hysteresis현상이 존재하기 때문에 gray-scale이 감소하며 잔상이 발생하는 등의 문제로 인

\* : 인하대학교 전기·전자·컴퓨터공학부  
(인천시 남구 용현동 253, Fax: 032-875-5882  
E-mail : wspark@inha.ac.kr)  
1998년 7월 3일 접수, 1998년 8월 24일 심사완료

하여 현재 제한된 분야에서 실용화되고 있을 뿐이다. 이러한 PDLC의 전기광학적 특성은 고분자 표면에서의 액정 분자의 거동과 액정 droplet의 형태 및 그 분산 구조에 의해 결정되어 지는 것으로 알려져 있다<sup>4-6)</sup>.

따라서 본 연구에서는 PDLC를 고정세 투사형 디스플레이에 본격적으로 사용할 수 있도록 하기 위하여 액정 및 고분자의 물성 특성과 함께 전기광학적 특성에 큰 영향을 미치는 셀 gap, 액정/고분자 혼합 분율, UV 조사시간 및 강도와 같은 공정조건의 최적화를 통하여 액정분자의 움직임과 droplet의 분산구조를 제어함으로써 문턱전압을 낮추는 동시에 hysteresis 특성을 개선하고자 한다.

2. 실험 방법

PDLC의 테스트 셀은 다음과 같은 방법으로 제작하였다. 먼저 투명전극(ITO)이 증착된 2장의 유리 기판(Corning사 7059)을 spacer가 혼입된 UV 접착제로 합착시켜 테스트 셀의 gap을 형성한 후 여기에 UV중합형 prepolymer와 nematic액정의 균일 복합물질을 모세관 현상을 이용해 주입시킨다. 균일 용액이 주입된 셀에 365 nm 파장의 UV를 조사시켜 prepolymer를 광중합시킨 후 셀 가장자리를 에폭시 수지로 봉지하여 테스트 셀을 제작하였다 (그림 1). 액정과 고분자 재료로는 Merck 사의 TL series 액정과 이에 가장 적합한 prepolymer 시스템으로 알려져 있는 PN 393을 사용하였으며 각각의 물성은 표 1 및 표 2에 보인 바와 같다.

테스트 셀의 전기광학적 특성은 그림 2의 장치를 이용하여 측정하였으며 인가전압은 100 Hz의 정현파로 하였다. 그림의 aperture는 off 상태에서 산란되는 빛을 차단하여 정확한 콘트라스트 비를 측정

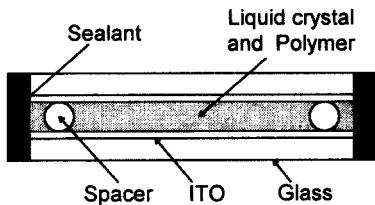


그림 1. 테스트 셀의 단면도

Fig. 1. The cross section of test cell

표 1. TL series 액정의 물성 특성

Table 1. Material parameters of TL series liquid crystals

	TL202	TL203	TL205	TL213
$\Delta \epsilon$ (1kHz, 20°C)	+6.1	+11	+5.0	+5.7
$\epsilon_{\parallel}$ (1kHz, 20°C)	9.6	15.2	9.1	10.0
$\Delta n$ (589nm, 20°C)	0.185	0.201	0.217	0.239
$n_o$ (589nm, 20°C)	1.523	1.529	1.527	1.527
$K_{11}$ [ $10^{-12}$ N] 20°C	19.10	15.80	17.30	16.8

표 2. 고분자 PN 393의 물성 특성

Table 2. Material parameters of polymer PN 393

Properties of the prepolymer	
viscosity of prepolymer	3 cSt (20°C)
viscosity of 80 wt/wt% TL 205 + PN 393	36 cSt (20°C)
maximum solubility of TN 205	81% (20°C)
Properties of the polymer	
refractive index of polymer (20°C, 589nm)	1.473
Tg of polymer	-27°C
Tg of polymer in PDLC film	-32°C

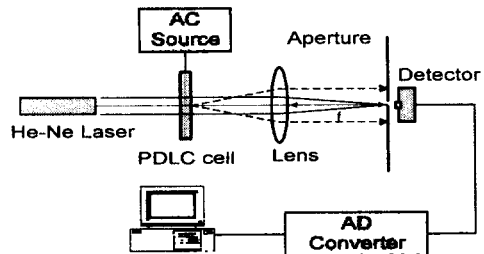


그림 2. PDLC 셀의 전기광학적 특성 측정장치

Fig. 2. Schematic diagram of measurement system

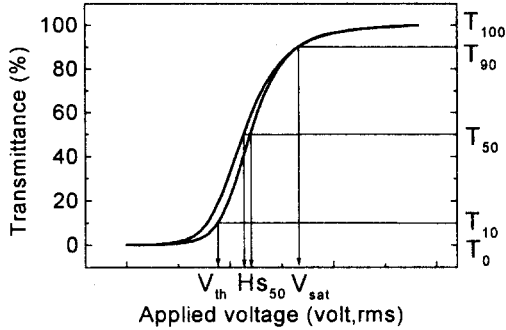


그림 3. PDLC의 전기광학 특성의 정의  
Fig. 3. Definition of electro-optical parameters of PDLC

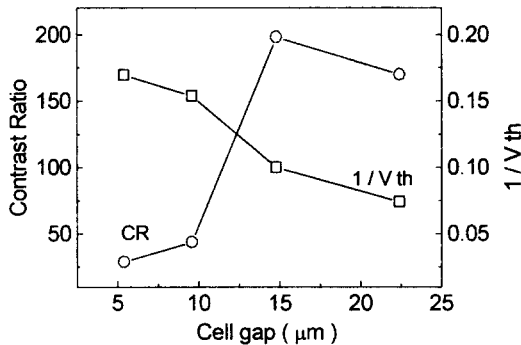


그림 4. 셀 gap에 따른 문턱전압과 콘트라스트 비  
Fig. 4. Dependence of threshold voltage and contrast ratio on cell gap

하기 위한 것으로 본 실험에서의 집광각은 약  $3^\circ$ 이다. 전기광학적 특성을 나타내는 값들은 그림 3과 같이 정의하였다. 여기서  $T_0$ 와  $T_{100}$ 은 각각 PDLC의 최소투과율과 최대투과율을 나타내며  $V_{th}$ 와  $V_{sat}$ 은 상대투과율이 각각 10% 및 90%가 되는 문턱전압과 포화전압을 나타낸다. 또한 hysteresis는 투과율 50%를 보이는 on, off 시의 인가전압차  $Hs_{50}$ 으로 정의하며 콘트라스트 비는 최대투과율과 최소투과율의 비로 정의한다.

### 3. 결과 및 고찰

먼저 문턱전압과 콘트라스트 비에 가장 크게 영

향을 미칠 것으로 예상되는 셀 gap을 최적화 하기 위하여 셀 gap의 변화에 대해 그 특성을 조사하였다. 그 후 셀의 제작순서에 따라 일정 UV 조사 조건에서 액정과 prepolymer의 종류 및 조성비를 변화시켜 보았으며 다음 순차적으로 UV 조사시간, 조사강도 등을 변화시켜 가면서 전기광학적 특성의 변화를 조사하였다.

첫째로 각기 다른 두께의 테스트 셀을 제작하여 각각에 대해 문턱전압과 콘트라스트 비를 측정하고 결과 그림 4에서 보이는 바와 같이 셀 gap의 증가에 대해 문턱전압은 증가하였고 콘트라스트 비는 약  $15 \mu\text{m}$  근처에서 최고치를 보인 후  $20 \mu\text{m}$  이상에서는 약간 감소하였다. 이러한 콘트라스트 비의 감소는 셀이 어느 정도 이상 두꺼워지면 산란의 정도가 포화되어  $T_{off}$ 가 일정해지는 반면  $T_{on}$ 은 감소하기 때문인 것으로 생각된다. 이로부터 셀 gap을 문턱전압과 콘트라스트 비를 동시에 고려하여  $12 \sim 13 \mu\text{m}$ 로 고정하였다.

다음은 액정/고분자 혼합비에 따른 콘트라스트 비 및 hysteresis의 변화를 조사하였으며 그 결과를 그림 5에 보인다. 그림으로부터 액정이 약 80% 정도일 때 콘트라스트 비와 hysteresis 특성이 최적임을 알 수 있다. 액정 농도가 80% 이상이 되면 고분자 network이 효율적으로 형성되지 않으며 또한 액정 농도가 낮을 경우 droplet의 크기가 매우 작아져 산란효율이 감소하기 때문에 콘트라스트 비가 감소하는 것으로 생각된다. 여기서 80%는 액정의 고분자에 대한 최대 용해도와 일치하며 따라서 용해범위 내에서 고분자에 대한 액정의 분율이 증가할수록 특성이 개선됨을 알 수 있다.

또한 자외선 조사시간을 변화시켜 보았을 때 일정한 시간이 지난 후에는 콘트라스트 비와 hysteresis가 거의 포화되어 안정됨을 알 수 있다(그림 6). 따라서 본 실험에서는 자외선 조사시간을 약 2분으로 고정하였다.

이상의 조건에서 표 1의 각 액정에 대하여 자외선 강도를 변화시켜가며 테스트 셀을 제작, 문턱전압과 hysteresis를 측정하였다. 자외선 조사강도를 변화시킬 경우 액정에 따라 약간의 차이는 있으나 문턱전압과 hysteresis 모두 일정 조사강도 이상이 되면 특정 값으로 안정됨을 알 수 있었다. 그림 7은 그중 액정 TL205의 문턱전압과 hysteresis를 자외선 조사강도에 대하여 나타낸 것이다.

한편 액정의 물성 파라미터가 PDLC의 전기광학 특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 먼저 문턱전압에 크게 영향을 미칠 것으로 생각되는 유전율 이방성에 대한 문턱전압의 변화를 조사하였다. 그림 8은 측정결과를 나타낸 것으로서 양자사이에 명확한 상관관계는 없음을 알 수 있다. 일반적으로 TN 모드에서는 유전율 이방성  $\Delta \epsilon$ 이 클수록 문턱전압이 낮아지는데 반해 PDLC의 경우  $\Delta \epsilon$ 이 큰 TL203 액정의 경우에도 문턱전압이 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 비저항의 영향으로 설명할 수 있다. 즉 droplet 내에 존재하는 전기장  $E'$ 은 식 (1)로 표현되는데

$$E' = \frac{3E}{(\epsilon_k/\epsilon_p + 2)} \quad (1)$$

이때 도전율이 0이 아닌 경우  $\epsilon = \epsilon' + j/\rho\omega$  와 같이 유전율 손실항을 갖게 된다<sup>7)</sup>. 여기서 E는 인가된 전기장의 세기,  $\epsilon_k$ 는 액정의 유전율,  $\epsilon_p$ 는 고분자의 유전율이다. 특히 PDLC와 같이 액정 droplet이 고분자 내에 분산된 구조의 경우 고분자 network의 영향으로 droplet 내의 액정의 비저항이 낮아지기 때문에 식 (1)은 식 (2)와 같이 표현되어 질 수 있다.

$$E' = \frac{3V}{d(\rho_p/\rho_k + 2)} \quad (2)$$

여기서 V는 인가전압, d는 셀 gap,  $\rho_p$ 는 고분자의 비저항,  $\rho_k$ 는 액정의 비저항이다. 이를 일반적인 bipolar 구조의 문턱전압 계산에 적용할 경우 식 (3)과 같이 표현된다.

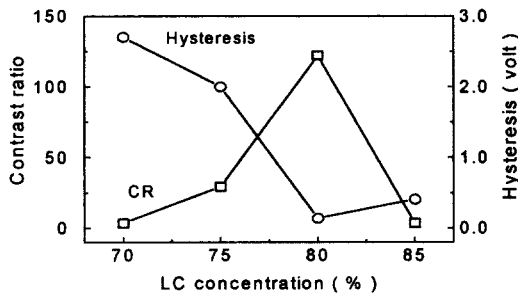


그림 5. LC 조성비에 따른 콘트라스트 비와 hysteresis  
Fig. 5. Dependence of contrast ratio and hysteresis on liquid crystal concentration

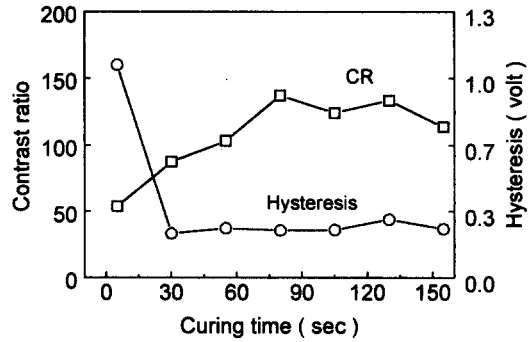


그림 6. 조사시간에 따른 콘트라스트 비와 hysteresis  
Fig. 6. Dependence of contrast ratio and hysteresis on UV curing time

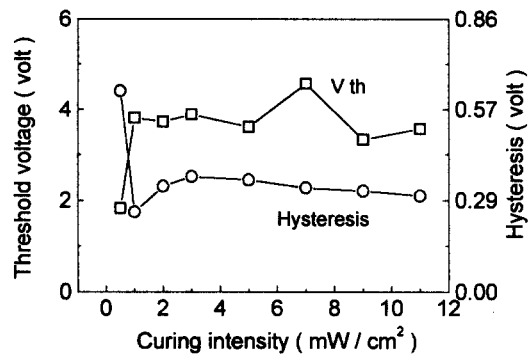


그림 7. 조사강도에 따른 문턱전압과 hysteresis  
Fig. 7. Dependence of threshold voltage and hysteresis on curing intensity

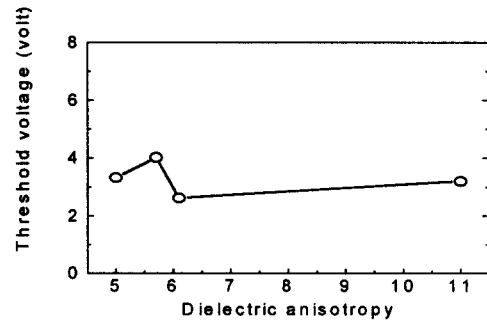


그림 8. 유전율 이방성과 문턱전압과의 관계  
Fig. 8. Correlation between dielectric anisotropy and threshold voltage

$$V_{th} = \frac{d}{3a} \left( \frac{\rho_p}{\rho_c} + 2 \right) \left( K \frac{(l^2 - 1)}{\Delta \epsilon \epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

여기서 a는 droplet의 장축 길이, K는 탄성계수, l은 droplet의 타원율이다. 식 (3)으로부터 PDLC의 문턱 전압은 액정의 유전율보다 비저항에 의해 크게 좌우됨을 알 수 있다. 이러한 모델은 그림 8과 그림 9의 실험 결과와도 잘 일치하는 것으로서 문턱전압을 낮추기 위해서는 액정의 유전율 이방성보다는 오히려 비저항을 높이는 것이 효과적임을 알 수 있다.

Hysteresis 현상은 계면에서의 anchoring 에너지, 탄성에너지, 전기적 에너지 등이 서로 평형을 이루는 상태에서 결정되는 것으로 생각할 수 있다. 여기서 표면에너지가 hysteresis 특성에 미치는 영향에 대해서는 액정/고분자 종류 및 조성비를 조정하고 droplet 구조를 결정하는 공정조건을 엄밀히 제어함으로써 최적화할 수 있다. 다음으로 탄성에너지의 영향을 조사하기 위하여 탄성계수의 변화에 대한 hysteresis 특성을 측정, 그림 10에 나타내었다. 그림으로부터 탄성계수가 증가함에 따라 hysteresis가 증가함을 알 수 있는데 이는 다음과 같이 설명할 수 있다. 즉, 외부의 인가전압에 의해 전계의 방향으로 정렬한 액정 분자는 전압을 제거하면 표면에너지와 탄성에너지만의 균형에 의해 원래의 상태로 복귀하게 되는데 이때 splay 탄성계수가 클수록 복귀에 지연이 생기게 되어 hysteresis 현상이 심화되는 것으로 해석할 수 있다.

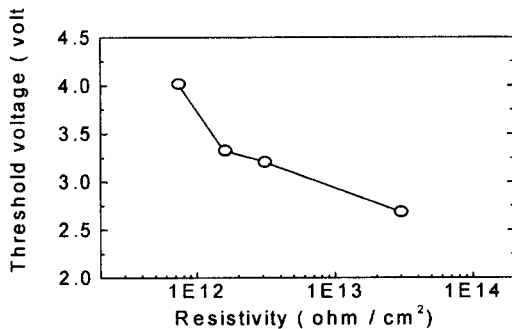


그림 9. 비저항과 문턱전압과의 관계  
Fig. 9. Correlation between resistivity and threshold voltage

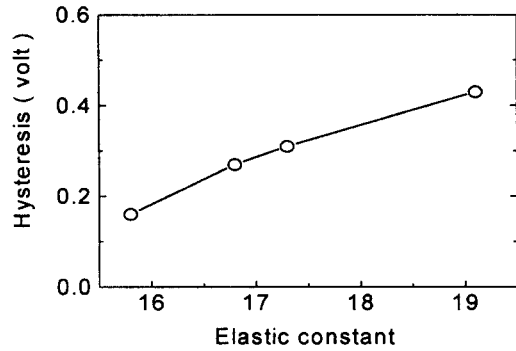


그림 10. 탄성계수와 hysteresis와의 상관관계  
Fig. 10. Correlation between elastic constant and hysteresis

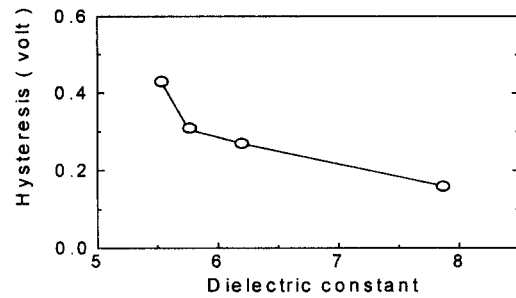


그림 11. 유전율과 hysteresis와의 상관관계  
Fig. 11. Correlation between dielectric constant and hysteresis

또한 전기적 에너지의 영향과 관련하여 유전율을 변화시켜 가면서 hysteresis 특성을 측정하였다. 그림 11에 보이는 바와 같이 유전율이 증가할수록 hysteresis가 감소함을 보였다. 이로부터 액정의 유전율이 커지면 액정분자의 거동은 탄성에너지 효과보다 상대적으로 전기적 에너지에 의해 결정되어지며 따라서 hysteresis가 감소하는 것으로 해석할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 PDLC를 고정세 디스플레이에 본격적으로 적용할 수 있도록 하기 위하여 PDLC의 물질선정과 공정조건을 최적화함으로써 그 전기광학적 특성을 획기적으로 개선하였다. 주요 결과를

요약하면 다음과 같다.

1. 액정/고분자 복합물질로는 Merck사의 TL203, 205/ PN393을 선정하여 높은 콘트라스트 비와 낮은 hysteresis를 얻었다.
2. 셀 gap은 콘트라스트비와 문턱전압을 고려하여 약 13  $\mu\text{m}$ 으로 고정하였다.
3. 액정의 혼합비율은 고분자속에서의 최고 용해도인 약 80 % 범위에서 최적의 특성을 나타내었다.
4. 문턱전압과 액정의 유전율 이방성과의 상관관계는 보이지 않았으나 비저항과는 상관성이 있음을 확인하였다.
5. hysteresis는 splay 탄성계수가 커질수록 증가하였으며 유전율이 커질수록 감소하였다.

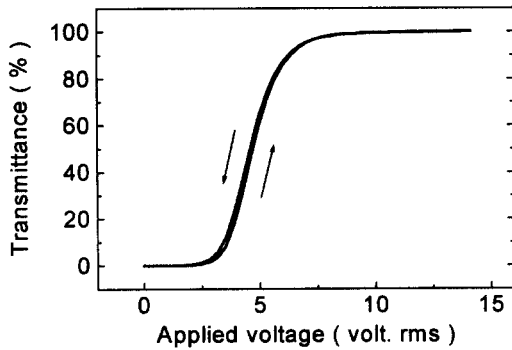


그림 12. 최적화된 PDLC 셀의 전기광학적 특성  
 Fig. 12. Electro-optical properties of optimized PDLC cells

이상의 공정조건과 물질을 적용하여 문턱전압 3.1 V, 콘트라스트 비 150, hysteresis 0.08 V의 양호한 특성의 PDLC 셀을 제작할 수 있었다 (그림 12).

### 감사의 글

본 연구는 인하대학교 1996년도 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

### 참 고 문 헌

1. J. L. Ferguson, "Polymer Encapsulated Nematic Liquid Crystals for Display and Light Control Applications", SID '85 Digest, pp. 68-70, 1985
2. J. W. Doane, N. A. Vaz, B. G. Wu and S. Zumer, "Field controlled light scattering from nematic microdroplets", Appl. Phys. Lett., Vol. 48, pp. 269-271, 1986
3. Birendra Bahadur, Liquid Crystals Applications and Uses, Vol. 1, World Scientific, pp. 364-367, 1990
4. P. S. Drazic, "Polymer dispersed nematic liquid crystal for large area displays and light valves", J. Appl. Phys, Vol. 60, No. 6, p. 2142, 1986
5. S. Niiyama, Y. Hirai, Y. Ooi, M. Kunigita, H. Kumai, T. Wakabayashi, S. Iida and T. Gunjima, " Hysteresis and Dynamic Response Effects on the Image Quality in a LCPC Projection Display", SID '93 Digest, pp. 869-872, 1993
6. J. De Baets, J. Capon, A. M. De Cubber, H. De Smet, A. Van Calster, J. Vanfleteren, T. Fujisawa, H. Ogawa, M. Aizawa and H. Takatsu, "Hysteresis phenomena in active matrix addressed polymer network liquid crystal displays", Euro Display, pp. 117-120, 1993
7. Birendra Bahadur, Liquid Crystals Applications and Uses, Vol. 1, World Scientific, pp. 368-376, 1990