

높은 명암대비 동작을 위한 쌍안정 TN셀의 광학 조건 최적화

이기동 · 김기홍 · 윤태훈 · 김재창

부산대학교 전자공학과

(2000년 1월 21일 받음, 2000년 4월 4일 수정본 받음)

본 논문에서는 명암대비와 밝기를 높일 수 있는 반사형 쌍안정 TN셀의 광학 조건을 최적화 하였다. 세 파장(450 nm, 550 nm, 650 nm)의 광 특성을 고려해서 반사형 쌍안정 TN셀의 최적화된 광학 파라미터 값을 찾았고, 각각의 광학 파라미터가 반사형 쌍안정 TN셀의 광 특성에 미치는 영향을 살펴보았다. 그 결과 편광판 각도를 다른 광학 파라미터보다 더욱 정밀하게 제어해야 하며, $d\Delta n$ 값이 낮은 상태의 색 특성에 영향을 미침을 알 수 있었다. 광대역 $\lambda/4$ 필름을 사용해서 반사형 쌍안정 TN셀을 제작해 10.6:1이라는 명암대비를 얻었다.

I. 서 론

1980년대 초 꼬인 액정 셀이 쌍안정 스위칭 특성을 나타낸다는 것이 알려진 후,^[1] 쌍안정 액정 소자에 대한 관심이 증가하고 있다.^[2-14] 특히 최근의 매트릭스 구동 쌍안정 TN 패널의 실현은 쌍안정 액정표시소자의 실제 응용의 가능성을 증가시켰다.^[2] 직교한 편광판 사이에 놓여진 쌍안정 TN 셀은 광 쌍안정 특성, 빠른 스위칭 시간, 높은 명암대비, 광 시야각을 갖는다.

저 전력소모와 경량화로 인해 반사형 액정표시소자에 대한 관심이 증가하고 있다. 최근에 제안된 밝기를 높일 수 있는 단일 편광판 모드는 반사형 액정표시소자에 적합하다고 알려져 있다.^[15] 단일 편광판 모드 반사형 액정표시소자는 뒤쪽의 편광판을 제거함으로써 밝기를 높일 수 있고, 셀 안쪽의 투명전극 대신에 금속 반사판을 사용해서 표시소자의 해상도를 떨어뜨리는 시차문제를 줄일 수 있다.

쌍안정 TN 액정표시소자도 단일 편광판 모드 반사형 표시소자로 구현될 수 있다. 단순한 구조와 뛰어난 광 특성 때문에 하나의 편광판 만을 사용한 반사형 쌍안정 TN 셀이 최근에 연구되고 있다.^[10-14] 그러나 어두운 상태의 누설광 때문에 단일 편광판 반사형 셀은 높은 명암대비를 얻기가 힘들다. 완전히 어두운 상태를 만들기 위해서는 액정 층을 두 번 통과한 반사된 빛의 편광 상태는 가시광선 전영역에서 90도 회전해야 한다. 그러나 단일 편광판 반사형 셀은 반사된 빛의 위상분산 때문에 단 하나의 주파수에서 선 편광상태를 나타낸다. 이것은 설계된 하나의 파장 이외의 다른 가시광선 파장에서는 어두운 상태에서 심각한 누설광을 일으킨다. 반사형 셀의 이런 결점을 해결하기 위해 광대역 $\lambda/4$ 필름을 이용해서 모든 가시광선 영역에서 반사된 빛을 선편광으로 만들어야 한다.^[13] 가시광선 전영역에서 $\lambda/4$ 필름으로 동작하는 광대역 위상 지연 필름을 사용함으로써 반사형 셀에서 누설광이 거의 없는 어두운 상태를 만들 수 있다.

본 논문에서는 높은 명암대비와 반사율을 갖는 단일 편광판

반사형 쌍안정 TN 셀의 광학 조건을 최적화 했다. 이전 연구들은 단일 파장에서만 설계를 했는데, 이것은 가시광선 전영역에서 최적화 되지 않았기 때문에 설계 파장 이외의 다른 파장에서의 광 특성은 보장할 수 없었다. 따라서 빨강, 초록, 파랑의 세가지 파장에서 광 특성을 고려해 셀의 광학 조건을 최적화 했다. 즉, 단 하나의 설계된 파장에서 뛰어난 특성보다는 전 가시광선 영역에서 좋은 특성을 갖는 최적화된 광학 조건을 찾았다. 또한 반사형 쌍안정 TN 셀의 명암대비를 높이기 위해 광대역 $\lambda/4$ 필름을 사용해서 어두운 상태의 밝기를 줄였다. 광대역 필름 없이는 단일 편광판 모드 반사형 쌍안정 TN 셀은 높은 명암대비를 가질 수 없음을 확인했다.

또한 각각의 광학 파라미터가 반사형 쌍안정 TN 셀의 광 특성에 미치는 영향도 살펴보고, 실제로 단일 편광판 반사형 쌍안정 TN 셀을 제작해 10.6:1이라는 명암대비를 얻었다. 그 결과를 두 장의 편광판을 사용한 셀과 $\lambda/4$ 필름을 사용하지 않은 단일 편광판 반사형 쌍안정 TN 셀과 비교해 보았다.

II. 쌍안정 TN 셀의 동작 원리

적절한 펄스를 인가함으로써 쌍안정 TN 셀을 스위칭 시킬 수 있다.^[13] 꼬인 셀을 스위칭 시키기 위해서는 selection 펄스를 인가하기 전에 액정 분자가 기판 표면에 대해 거의 수직으로 배열하는 reset 상태를 만들어야 한다. Reset 상태에서부터 두 가지 준안정상태가 selection 펄스에 의해 선택될 수 있다. 만약 selection 펄스의 전압(V)이 포화 전압(V_{sat})보다 크게 되면 액정 분자들은 적게 꼬인 상태로 전이한다. 반면, 임계 전압(V_{th})보다 작으면 액정 분자는 많이 꼬인 상태로 전이한다. 각각의 선택된 상태의 액정 분자들은 기판 표면에 평행하게 배열되기 때문에 쌍안정 TN 셀의 광 시야각 특성이 설명된다. $V_{th} < V < V_{sat}$ 일 경우에는 많이 꼬인 상태와 적게 꼬인 상태가 공존하는 polydomain 영역이 나타난다. 각각의 영역은 selection 펄스 전압 V에 의존한다.

III. 반사형 쌍안정 TN 셀의 설계

단일 편광판 반사형 액정 셀의 동작은 빛이 액정 셀을 두 번 통과하는 것을 기초로 하기 때문에 밝은 상태에서 반사형 셀의 위상지연은 반 파장이 되어야 하고 어두운 상태에서는 사분의 일 파장이 되어야 한다. 반사형 셀에서 위상지연이 반 파장이 될 때 액정 셀의 두 번 통과는 입력 빛의 편광상태를 180도 회전시키고 밝은 상태가 나타난다. 반면에 사분의 일 파장이 될 때 액정 셀의 두 번 통과는 입력 빛의 편광상태를 90도 회전시키고 완전히 어두운 상태를 나타낸다. 높은 명암대비를 얻기 위해서는 어두운 상태의 위상지연은 가시광선 전 영역에서 입력 빛의 파장에 개되지 않아야 한다. 그렇지 않으면 파장에 따른 분산이 발생하는데, 이것은 셀의 어두운 상태에서 심각한 누설광을 야기시킨다.

단일 편광판 모드에서 어두운 상태의 누설광은 위상지연의 고유한 특성인 분산 때문에 발생한다. 광대역 $\lambda/4$ 필름은 가시광선 전영역에서 반사된 빛의 편광상태를 90도 회전시키기 때문에 어두운 상태의 누설광을 줄일 수 있다. 많이 꼬인 상태에서 액정 층에 의한 빛의 편광은 영향을 받지 않고 $\lambda/4$ 필름의 영향만 받기 때문에 광대역 $\lambda/4$ 필름을 사용한 반사형 쌍안정 TN 셀의 많이 꼬인 상태는 어두운 상태를 나타낸다. 좋은 광 특성을 얻기 위해서는 많이 꼬인 상태에서 Mauguin 조건을 완전히 만족하지 말아야 한다.

그림 1은 $\lambda/4$ 필름을 사용한 반사형 쌍안정 TN 셀의 일반적인 구조를 나타낸다. 반사형 쌍안정 TN 셀은 편광판, 광대역 $\lambda/4$ 필름, 쌍안정 TN 액정 층, 그리고 금속 확산 반사판으로 구성된다. 광대역 $\lambda/4$ 필름을 사용한 반사형 쌍안정 TN 셀을 설계하기 위해서 광학 파라미터를 변화시켜 가며 반사율을 계산했다.¹⁶⁾ 반사형 쌍안정 TN 셀의 최적화된 설계 조건을 찾기 위해 액정 층의 입력측 광축에 대한 편광판 각도(α), $\lambda/4$ 필름의 빠른 축(χ), 액정 층의 꼬임각(ϕ), 셀의 위상지연($d\Delta n$)과 같은 광학 파라미터의 함수로 명암대비와 반사율을 계산했다.

붉은색(650 nm), 녹색(550 nm), 파란색(450 nm)의 세 파장에서 광 특성을 계산하였다. 이전의 설계는 가시광선 전 영역에서 최적화 되지 않았기 때문에 설계된 파장 이외의 가시광선 영역에서의 광 특성은 보장되지 않았다. 하나의 설계된 파장에서의 뛰어난 광 특성보다는 전 가시광선 영역에서 좋은 광 특성을 나타내는 최적화된 광학 조건을 찾았다. 표 1은 반사형 쌍안정 TN 셀의 광 특성 수치 계산을 위한 광학 파라미터의 범위를 나타내고 있다.

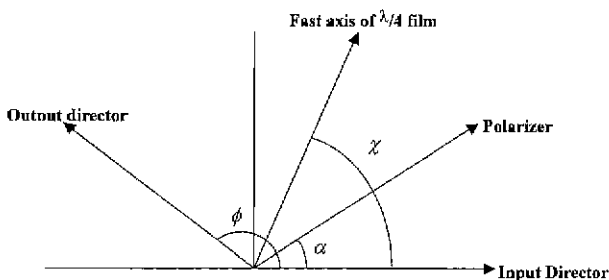


그림 1. 반사형 쌍안정 TN 셀의 구조.

표 1. 수치 계산을 위한 파라미터 범위

Parameters	Range	Step
α	$0^\circ \sim 180^\circ$	1°
χ	$0^\circ \sim 180^\circ$	1°
ϕ	$0^\circ \sim 270^\circ$	1°
$d\Delta n$	$0 \mu\text{m} \sim 0.3 \mu\text{m}$	$0.01 \mu\text{m}$

수치계산으로 광대역 $\lambda/4$ 필름을 사용한 단일 편광판 모드 반사형 쌍안정 TN 셀의 최적화된 초기 꼬임각은 178° 이다. 그러면 많이 꼬인 상태는 358° 이고, 적게 꼬인 상태는 -2° 가 된다. 최적화된 편광판 각도는 48° 이고, 액정 층의 위상지연 $d\Delta n$ 은 $0.14 \mu\text{m}$, 그리고 $\lambda/4$ 필름의 빠른 축 각도는 2° 이다.

어두운 상태의 반사율을 비교하기 위해 $\lambda/4$ 필름을 사용하지 않은 쌍안정 TN 셀과 두 장의 편광판을 사용한 반사형 쌍안정 TN 셀의 반사율도 계산했다. $\lambda/4$ 필름을 사용하지 않은 반사형 쌍안정 TN 셀의 계산으로 찾은 최적화된 꼬임각, 위상지연, 편광판 각은 각각 244° , $0.194 \mu\text{m}$, 0° 이다. 두 장의 편광판을 사용한 반사형 쌍안정 TN 셀에서는 $\lambda/4$ 필름의 빠른 축 대신에 뒤 쪽의 편광판 각도를 고려해야 한다. 계산된 최적의 꼬임각은 170° , 위상지연 $d\Delta n$ 은 $0.28 \mu\text{m}$, 앞쪽 편광판 각도는 47° , 뒤쪽 편광판 각도는 126° 이다.

그림 2는 각각의 최적화된 조건에서 어두운 상태의 파장에 따른 반사율을 계산한 결과를 나타내고 있다. $\lambda/4$ 필름을 사용하지 않는 경우 반사형 쌍안정 TN 셀의 반사율을 다른 두 경우와 비교해 보았다. 그림에서 보듯이 $\lambda/4$ 필름을 사용하지 않는 한 장의 편광판을 사용한 셀의 반사율이 다른 두 모드보다 훨씬 더 높다. $\lambda/4$ 필름을 사용함으로써 어두운 상태의 반사율을 크게 줄일 수 있다. $\lambda/4$ 필름을 사용한 셀의 어두운 상태의 반사율이 거의 0이기 때문에 명암대비가 크게 증가한다. 두 장의 편광판을 사용한 모드에서도 어두운 상태의 반사율은 매우 낮으나 밝은 상태의 반사율 또한 낮다. 따라서 높은 명암대비에도 불구하고 두 장의 편광판을 사용한 모드는 반사형 표시소자에 적합하지 않다.

그림 3은 $\lambda/4$ 필름을 사용한 경우와 사용하지 않은 경우 그

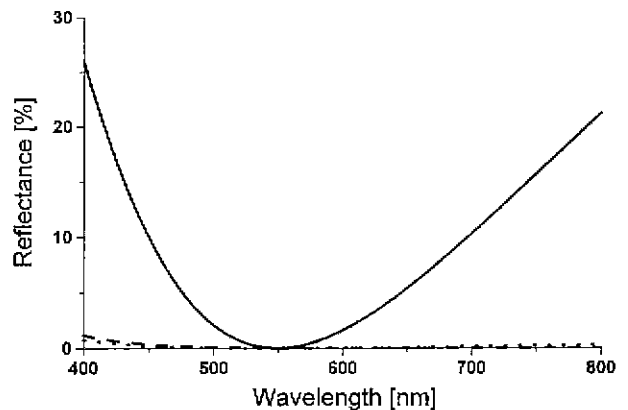


그림 2 반사형 쌍안정 TN 모드에서 어두운 상태의 반사율. 직선 : $\lambda/4$ 필름을 사용하지 않은 단일 편광판 모드. 점선 : $\lambda/4$ 필름을 사용한 단일 편광판 모드. 폐선 : 두 장의 편광판을 사용한 모드.

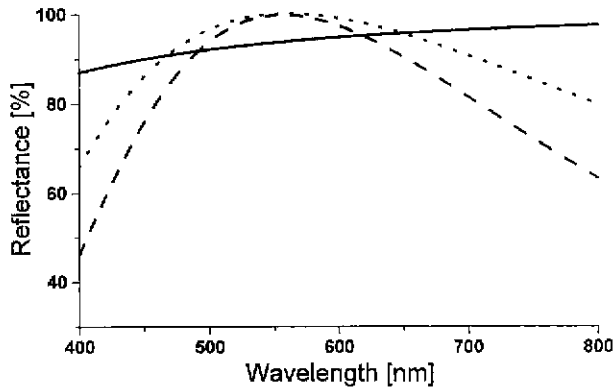


그림 3. 반사형 쌍안정 TN 모드에서 밝은 상태의 반사율.
 직선: $\lambda/4$ 필름을 사용하지 않은 단일 편광판 모드.
 점선: $\lambda/4$ 필름을 사용한 단일 편광판 모드.
 폐선: 두 장의 편광판을 사용한 모드.

리고 두 장의 편광판을 사용한 반사형 쌍안정 TN 셀의 밝은 상태의 파장에 다른 반사율을 나타내었다. $\lambda/4$ 필름을 사용하지 않은 경우와 사용한 단일 편광판 모드와 두 장의 편광판을 사용한 경우의 계산된 명암대비는 각각 9:1, 420:1, 590:1 이다. 이 결과는 $\lambda/4$ 필름을 사용한 단일 편광판 반사형 쌍안정 TN 셀은 높은 명암대비와 밝기를 동시에 만족함을 나타낸다.

IV. 광학 파라미터가 광 특성에 미치는 영향

각각의 광학 파라미터가 반사형 쌍안정 TN 셀의 광 특성에 미치는 영향을 알아보았다. 실제 설계에서는 제작 시 충분한 설계 여유를 가지고 좋은 광 특성을 유지하는지를 알아보기 위해 각 파라미터의 영향을 조사해야 한다. 각각의 광학 파라미터가 광 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 각 파라미터-편광판 각도, $\lambda/4$ 필름의 빠른 축, 액정 층의 위상지연, 액정 층의 꼬임각의 함수로 밝은 상태의 반사율과 명암대비를 계산했다.

그림 4는 편광판 투과축 각도에 따른 명암대비와 밝은 상태의 밝기를 계산 결과를 나타낸다. 명암대비는 편광판 각의 변화에 매우 민감하게 변하지만, 밝은 상태의 밝기는 편광판의 각에 상관

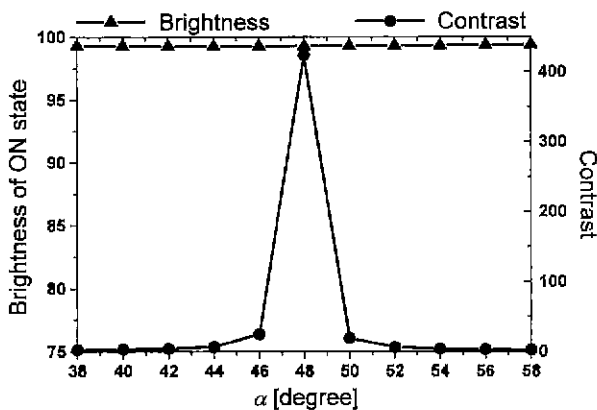


그림 4. 편광판 투과축 각도에 따른 반사형 쌍안정 TN 셀의 광 특성.

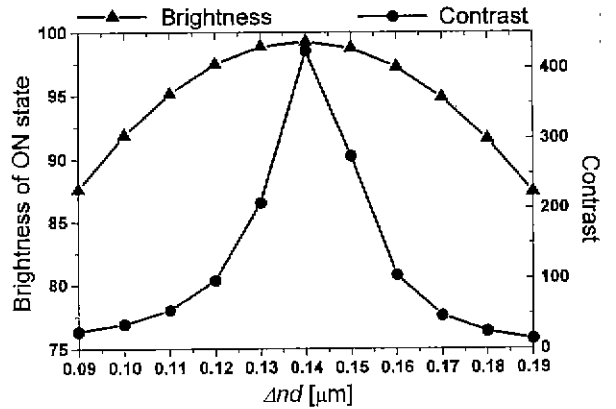


그림 5. 셀의 위상지연 $d\Delta n$ 에 따른 반사형 쌍안정 TN 셀의 광 특성.

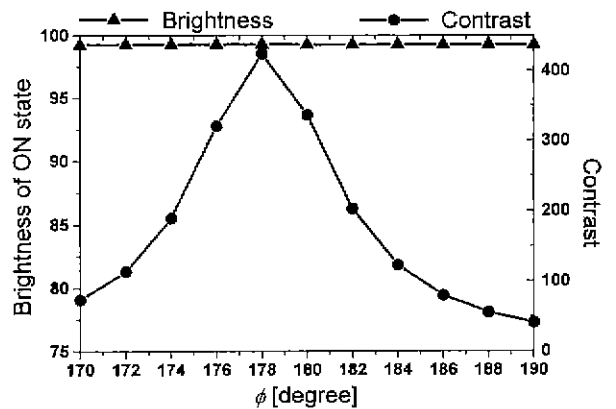


그림 6. 셀의 꼬임각에 따른 반사형 쌍안정 TN 셀의 광 특성.

없이 거의 일정하다.

위상지연 $d\Delta n$ 이 밝은 상태의 밝기와 명암대비에 미치는 영향을 그림 5에 나타내었다. 위상지연이 바뀔 때 따라 밝은 상태의 밝기는 크게 영향을 받는다.

그림 6은 꼬임각의 영향을 나타낸다. 반사형 쌍안정 TN 셀의 꼬임각은 명암대비에만 영향을 주며 밝은 상태의 밝기에는 영향을 주지 않는다.

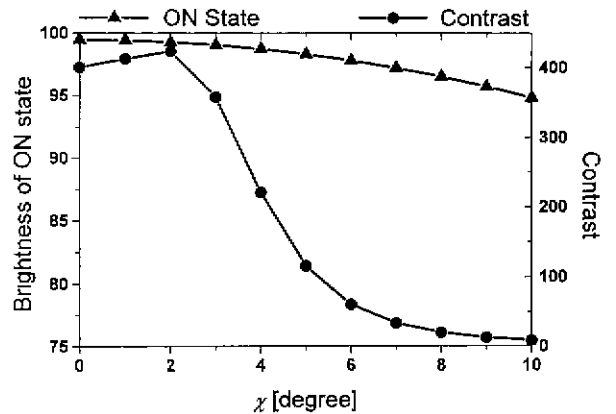


그림 7. $\lambda/4$ 필름의 빠른 축 각도에 따른 반사형 쌍안정 TN 셀의 광 특성.

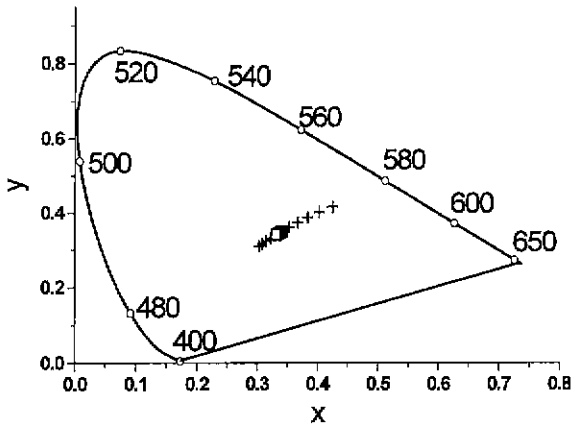


그림 8. 셀의 $d\Delta n(+)$ 와 $\lambda/4$ 필름의 빠른 축()에 따른 반사형 쌍안정 TN 셀의 색 특성.

그림 7은 $\lambda/4$ 필름의 빠른 축에 따른 광 특성의 의존성을 나타낸다. $\lambda/4$ 필름의 빠른 축의 변화는 밝은 상태의 밝기와 명암대비의 변화에 영향을 미친다.

요약하면 밝은 상태의 밝기는 셀의 $d\Delta n$ 과 $\lambda/4$ 필름의 빠른 축에 크게 영향을 받는다. 밝은 상태의 밝기 변화는 셀의 색 특성 변화를 일으킬 수 있다. 그림 8은 셀의 $d\Delta n$ 과 $\lambda/4$ 필름의 빠른 축에 따른 밝은 상태의 색 특성의 의존성을 나타내었다. 그림에서 보듯이 밝은 상태의 색은 셀의 $d\Delta n$ 에 크게 영향을 받지만, $\lambda/4$ 필름의 빠른 축에는 영향을 받지 않는다. 최적화된 조건에서 편광판 각도가 1° 바뀌면 계산된 명암대비는 대략 20%로 떨어진다. 이것은 다른 파라미터-코입자 (88%/도), $\lambda/4$ 필름의 빠른 축(96%/도), 셀의 $d\Delta n$ (81%/0.01 (m))가 광 특성에 주는 영향과 비교해보면 매우 큰 변화이다. 따라서 좋은 광 특성을 나타내기 위해서는 반사형 쌍안정 TN 셀에서 다른 광학 파라미터보다 더 정밀하게 편광판 각도를 제어해야 한다.

V. 실험 결과

설계의 타당성을 확인하기 위해 반사형 쌍안정 TN 셀을 제작했다. 셀 겹은 $2\ \mu\text{m}$ 이고 d/p 값은 0.59였다. 셀의 d/p 값을 제어하기 위해 S-811(E. Merck)이 사용되었다. 백색광원의 입사각이 -30° 일 때, 광대역 $\lambda/4$ 필름 (Nitto Denko)을 사용한 경우와 사용하지 않은 경우의 단일 편광판 모드 반사형 쌍안정 TN 셀에서 측정된 반사된 빛의 각 분포를 그림 9와 그림 10에 나타내었다. 셀의 구조에 관계없이 최대의 밝기는 30° 에서 관측된다. 그러나 셀 표면의 높은 반사 때문에 이 방향의 명암대비는 매우 낮다. 최대의 명암대비는 셀 표면의 수직 방향의 상을 관측함으로써 얻어진다. $\lambda/4$ 필름의 사용유무에 관계없이 수직 방향의 밝은 상태 밝기는 거의 비슷하다. 그러나 $\lambda/4$ 필름을 사용하지 않으면 어두운 상태의 반사율은 훨씬 더 높다. $\lambda/4$ 필름을 사용한 경우 수직 방향 명암대비는 10.6:1이고, 사용하지 않는 경우는 2.5:1이었다.

비교를 위해 투과형 쌍안정 TN 셀의 뒤쪽에 금속확산 반사판을 부착한 두 장의 편광판을 사용한 반사형 쌍안정 TN 셀

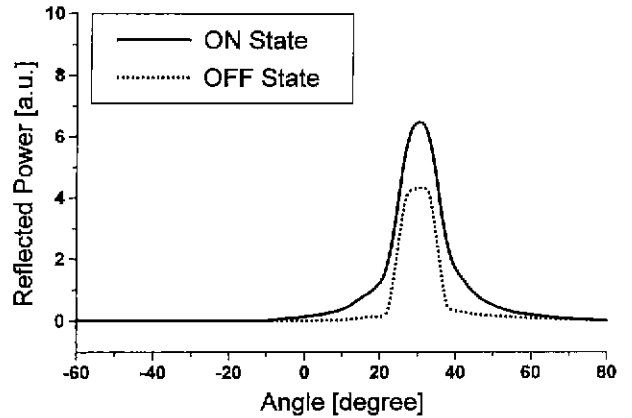


그림 9. $\lambda/4$ 필름을 사용한 단일 편광판 모드 반사형 쌍안정 TN 셀에서 측정된 반사된 빛의 각 분포.

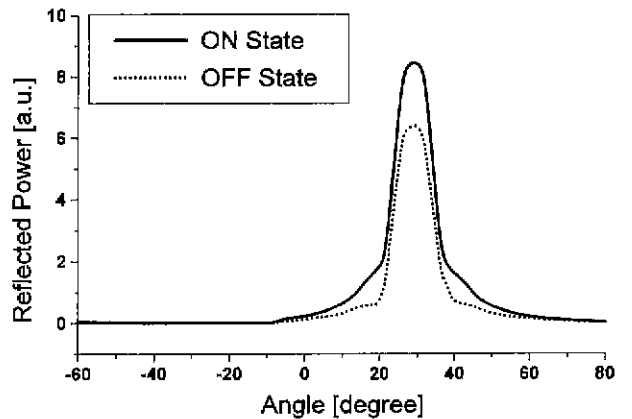


그림 10. $\lambda/4$ 필름을 사용하지 않은 단일 편광판 모드 반사형 쌍안정 TN 셀에서 측정된 반사된 빛의 각 분포.

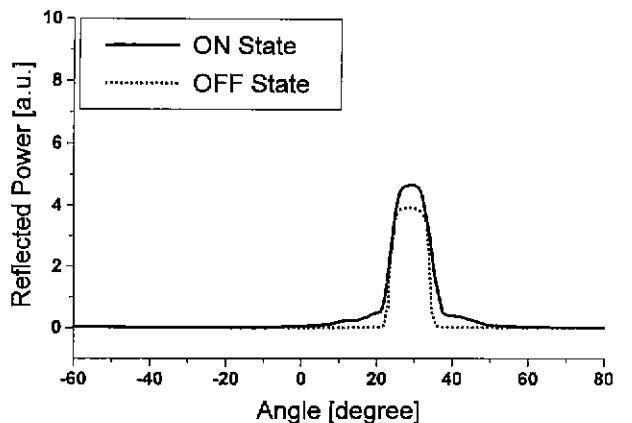


그림 11. 두 장의 편광판을 사용한 반사형 쌍안정 TN 셀에서 측정된 반사된 빛의 각 분포.

을 제작했다. 그림 11은 두 장의 편광판을 사용한 쌍안정 TN 셀의 반사특성을 나타낸다. 어두운 상태의 누설광이 단일 편광판 모드 쌍안정 TN 셀보다 적기 때문에 23:1이라는 더 높은 명암대비를 얻을 수 있었다. 그러나 밝기는 단일 편광판 모드 쌍안정 TN 셀보다 훨씬 줄어든다.

이 결과로 단일 편광판 모드는 밝기에서는 뛰어나지만 명암

대비에서는 열등함을 알 수 있다. 어두운 상태의 누설광 때문에 단일 편광판 모드의 명암대비가 떨어지므로, 이 문제를 해결하기 위해 광대역 $\lambda/4$ 필름이 사용된다. 따라서 $\lambda/4$ 필름을 사용한 단일 편광판 모드가 반사형 쌍안정 TN 표시소자에 더 적합하다고 결론을 내릴 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 높은 명암대비와 반사율을 갖는 단일 편광판 반사형 쌍안정 TN셀의 광학 조건을 최적화 하였다. 세 파장에서 광 특성을 계산해서 반사형 쌍안정 TN셀의 최적화 된 광학 파라미터 값을 찾았다. 전 가시광선 영역에서 좋은 특성을 갖는 반사형 쌍안정 TN셀의 최적화된 광학 조건을 찾았다.

단일 편광판 반사형 쌍안정 TN 모드에서 광대역 $\lambda/4$ 필름의 역할을 수치계산뿐만 아니라 실험에 의해서 확증했다. 또한 반사형 쌍안정 TN 셀에서 각각의 광학 파라미터가 광 특성에 미치는 영향을 연구했다. 그 결과 다른 광학 파라미터보다 편광판 각도를 더욱 정밀하게 제어해야 함을 알 수 있었다. 또한 $d\Delta n$ 값이 밝은 상태의 색 특성에 영향을 주는 것도 확인했다.

감사의 글

본 논문은 '99년도 정보통신 우수 시범 지원사업에 의해 연구되었음.

참고문헌

[1] D. W. Berreman and W. R. Heffner, Appl. Phys. Lett. **37**,

109 (1980).
 [2] T. Tanaka, Y. Sato, A. Inoue, Y. Momose, H. Nomura, and S. Iino, Asia Display **95**, 259 (1995).
 [3] J. C. Kim, G.-J. Choi, Y.-S. Kim, K. H. Kang, T.-H. Yoon, K. G. Nam, H. S. Kim, and E.-S. Lee, SID 97 Digest, 33 (1997).
 [4] C. D. Hoke, J. R. Kelly, J. Li, and P. J. Bos, SID 97 Digest, 29 (1997).
 [5] Charles D. Hoke, Jianlin Li, Jack R. Kelly and Philip J. Bos, Jpn. J. Appl. Phys. **36**, L227 (1997).
 [6] G.-D. Lee, H.-S. Kim, T.-H. Yoon, J. C. Kim, and E.-S. Lee, SID 98 Digest, 842 (1998).
 [7] G.-D. Lee, K. H. Park, K. C. Chang, T.-H. Yoon, J. C. Kim, and E.-S. Lee, Jpn. J. Appl. Phys. **38**, 809 (1998).
 [8] G.-D. Lee, K.-H. Park, K.-C. Chang, T.-H. Yoon, J. C. Kim, and E.-S. Lee, Asia Display 98 Digest, 299 (1998).
 [9] G.-D. Lee, G.-H. Kim, K.-H. Park, K.-C. Chang, T.-H. Yoon, J. C. Kim, and E.-S. Lee, SID 99 Digest, 862 (1999).
 [10] Z. L. Xie and H. S. Kwok, Jpn. J. Appl. Phys. **37**, 2572 (1998).
 [11] Y. J. Kim, Z. Zhuang, and J. S. Patel, SID 99 Digest, 866 (1999).
 [12] Z. Zhuang, Y. J. Kim, and J. S. Patel, Appl. Phys. Lett. **75**, 1225 (1999).
 [13] G.-D. Lee, H.-I. Baek, G.-H. Kim, T.-H. Yoon, J. C. Kim, and E.-S. Lee, Euro Display **99**, 307 (1999).
 [14] 백홍일, 장기철, 이기동, 윤태훈, 김재창, 한국광학회지, **10**, 279 (1999).
 [15] T. Ogawa, S. Fujita, Y. Iwai, and H. Koseki, SID 98 Digest, 217 (1998).
 [16] H. S. Kwok, J. Appl. Phys. **80**, 3687 (1996).

Configuration optimazation of a reflective bistable twisted-nematic cell for high contrast operation

Gi-Dong Lee, Gi-Hong Kim, Tae-Hoon Yoon and Jae Chang Kim

Department of Electronics Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

(Received January 21, 2000, Revised manuscript received April 4, 2000)

In this paper, the configuration of a reflective bistable twisted nematic (BTN) liquid crystal cell is optimized for high contrast and high brightness operation. We searched for the optimum optical parameters of a reflective BTN cell by calculating its optical performances at 3 wavelengths: red, green, and blue. By studying the effect of each optical parameter on the optical performances, we found that the angle of the polarizer is more important than any other optical parameters in the design of a reflective BTN cell. We fabricated a reflective BTN cell with a wide-band retardation film, whose measured contrast ratio is 10.6:1.