

기술 특 집

차세대 동영상 구현 단말기용 저소비전력 반투과형 TFT-LCD 모드

김재창, 윤태훈, 김병규(부산대학교 전자전기정보컴퓨터공학과), 이승희(전북대학교 신소재고분자공학과)

I. 서 론

현재 단말기 업체에서 제시하고 있는 4인치급 디스플레이부의 소비전력은 35mW 이하이나, 동화상 구현이 가능한 이동통신기기용 TFT-LCD와 유기 ELD의 소비전력은 각각 200mW와 500mW급이기 때문에 실제 그 격차는 상당하다. 유기 ELD의 경우 소비전력을 줄이기 위해서는 재료의 개발, 구동방법의 개선 등 많은 난제를 해결해야만 가능하기 때문에 IMT 2000 서비스가 본격적으로 시행되는 시점까지 이러한 문제를 해결하고 시장에 진입한다는 것이 거의 불가능할 것으로 판단된다. 반면, TFT-LCD의 경우에 주변광원을 이용하는 반사형을 채택하면 소비전력의 약 70%를 차지하는 배면광원의 사용을 줄일 수 있기 때문에 현격한 소비전력의 절감을 기대할 수 있다. 이러한 이유 때문에 반사형 칼라 LCD는 차세대 휴대용 디스플레이 소자로서 가장 주목받고 있으며, 이에 대한 연구가 시급하고 반사형 부품 최적화, 표시모드의 최적화 기술 등의 기초기술 연구에 대한 투자가 요구되고 있다.

기존의 반사형 칼라 LCD는 이동통신 시스템의 요구사항이 동화상 전송이 아니기 때문에 동화상 표시에 대한 요구가 없었다. 그러므로 응답속도도 느리고 콘트라스트 및 반사율 등의 광학특성이 떨어져 동화상 표시에는 적합하지 않다. 따라서, 동화상 표시에 적합한 표시모드의 개발과 응답속도의 향상 그리고 표시모드의 최적화에 따른 광특성의 극대화가 반드시 필요하다. 반사형에서의 LCD를 이용한 동화상 표시는 크게 두 가지 조건을 만족해야 한다. 우선, 액정의 응답속도가 빨라야 한다. 액정의 응답속도는 동화상 표시가 가능한 주파수(약 33 Hz)에 대응해야 하고 최대한의 반사율을 확보하기 위하여 최소한 15ms 이하의 응답시간을 가져야 한다. 이와 더불어 광학특성이 우수해야 한다. 일반적으로 반사형 LCD는 주변광을 광원으로 이용하므로 투과형에 비하여 광원의 위치, 세기 및 색온도에 따라 그 특성이 변화하기 쉬워 광특성이 떨어진다. 따라서 콘트라스트, 반사율 및 시야각 특성과 같은 광특성이 우수해야 표시화면의 품질을 향상시킬 수 있다. 특히, 주변광원이 거의 없는 밤이

나 실내에서 이와 같은 광학특성의 최적화가 이루어지지 않으면 전송되는 정보의 양이 아무리 많아도 화상표시에 의한 정보전달이 불충분할 것이다. 때문에 최근 국내외의 TFT-LCD업계는 반사형 LCD의 암수행 기술을 확보하기 위해서 많은 연구가 진행 중이다.

반사형 LCD의 장점을 유지하면서도 밤이나 어두운 곳에서도 고화질의 광학 특성을 갖도록 하는 방법은 front light 시스템을 이용하는 전반사형 LCD와 반사모드와 투과모드를 동시에 사용하는 반투과형 LCD로 크게 나눌 수 있다. 전반사형 LCD는 화상표시부 앞에 front light system이 놓여 설계된 LCD의 광학특성을 저하시키기 때문에 샤프, 도시바 등의 국외업체는 물론 삼성전자, LG, Philips LCD 등의 국내업체들은 반투과형 LCD를 채택하여 연구 중이다. 반투과형 LCD의 가장 손쉬운 설계 방법은 2-polarizer mode 반사형 LCD를 기초로 하는 것이다. 하지만 2-polarizer mode 반사형 LCD는 반사 휘도가 극히 낮고, 설계상 액정층과 반사판 사이에 유리기판과 편광판이 놓이기 때문에 시차문제가 심각해질 수 있다. 이러한 문제점을 극복할 수 있는 방법이 1-polarizer mode 반사형 LCD를 기초로 설계하는 것이다. 반투과형 LCD로 1-polarizer mode 반사형 LCD를 적용한 연구는 국내외적으로 금속반투막을 이용한 반투과형 LCD의 설계와 같은 간단한 방법 외에는 거의 연구가 되어 있지 않은 실정이다.

반투과형 TFT-LCD 네마틱 액정 모드 중 VA, OCB 및 FFS 모드는 고속응답구현이 가능하며, 시야각 특성이 우수할 뿐만 아니라 저 소비전력과 동화상구현을 동시에 만족할 수 있으므로 차세대 주력 표시기술로서 IMT 2000 통신방식이 채택된 이동통신기기의 디스플레이용으로 가장 적합한 화상표시방식이 될 것으로 전망된다. 하지만, 국내외적으로 반투과형 TFT-LCD의 설계기술은 아직 초보단계이므로 반투과 방식에 대한 기초기술은 물론 반사형과 투과형에 동시에 적용될 수 있는 모드의 개발, 시야각·시차·색 분산특성·명암대비비·휘도 등의 광특성이 최적화될 수 있는 광학적 배치 연구에 관한 핵심기술도 아직 구비되어 있지 않은 실정이다. 따라서 반투과형 LCD에 대한 원천기술을 확

보하여 차세대 디스플레이 시장을 선점하는 것은 매우 중요한 일이다.

반투과형 LCD의 구조^[1-14]는 크게 Multi-cellgap 구조^[1]와 Half switching technique^[4] 그리고 Multi-retardation technique^[5, 7, 12, 13]으로 나눌 수 있다. Multi-cellgap 구조는 현재 일본 LCD 기업에서 주로 사용하고 있으며 반사 투과 모두 우수한 광학특성을 보이는 반면 제작공정이 힘들다는 단점을 가지고 있다. Half switching technique의 경우는 우수한 광학특성 뿐 아니라 반사 투과모드 둘 다 동일 셀갭을 사용하므로 제작공정도 간단하다는 장점을 가지고 있지만 두 개의 구동회로가 필요하다는 단점을 가진다. 이러한 단점을 보완하기 위해서, 즉 동일 셀갭에 하나의 구동회로 만을 사용하기 위하여 나온 반투과형 구조가 Multi-retardation technique이다. 여기에 소개되어지는 반투과형 구조는 Multi-retardation technique을 이용한 것이다.

반투과형 LCD의 개발과는 별도로 홀로그래프 기법^[15-29]을 PDLC에 도입한 Holographic PDLC(HPDLC)를 개발하면 후면광원은 물론 편광자나 칼라필터도 필요 없기 때문에 부피가 현저히 줄어들어 휴대형 디스플레이로의 장점을 지니고 있다. 하지만 비가역적 제작과정과 낮은 반사효율, 높은 구동전압, 수지화과정에서의 부피수축, 좁은 광시야각 등이 문제점으로 남아있다. 따라서 최근 미국과 일본 등 기술 선진국에서는 이러한 문제점들을 개선하기 위해 새로운 HPDLC 물질 개발에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 가시적인 성과들도 보고되고 있다. 따라서 우리나라도 미래 원천 기술개발 차원에서 HPDLC 물질개발을 서둘러야 하며, 이는 기술적, 문화적인 종속을 피해 동등하게 디스플레이 시장을 개척할 수 있다는 점에서 상당히 중요하다.

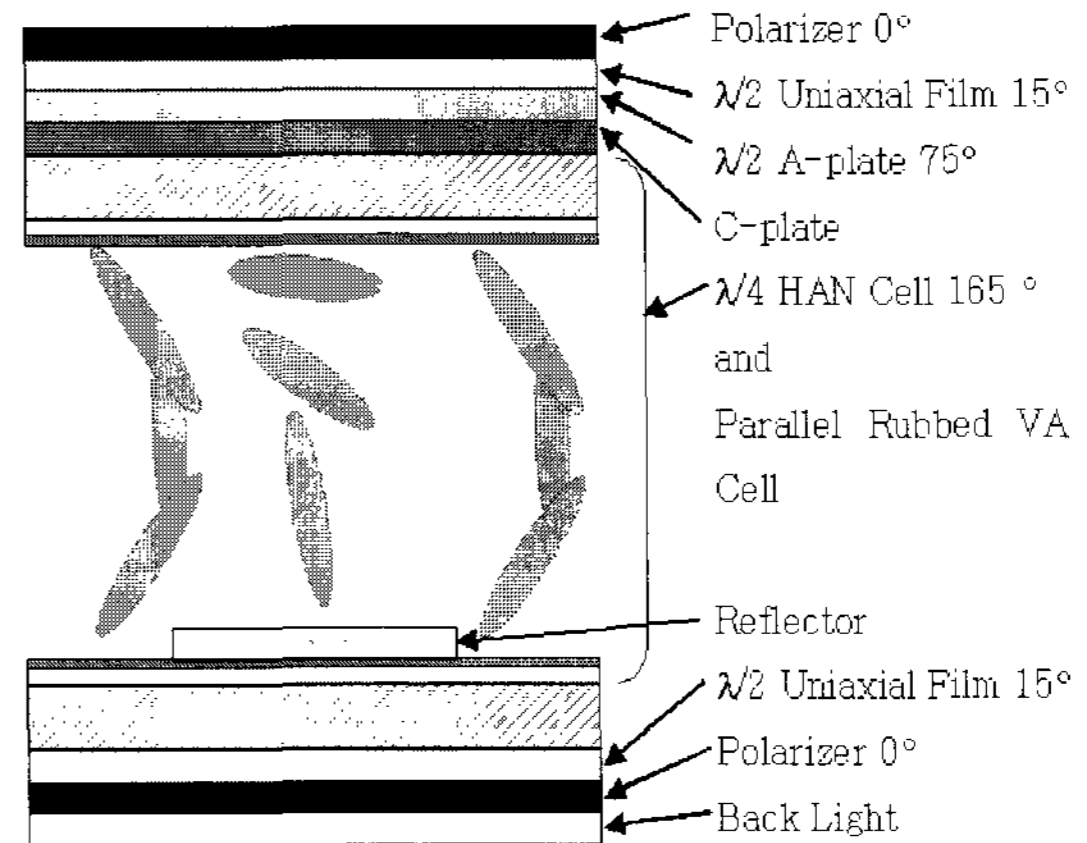
본 고에서는 과기부와 정통부의 지원을 받아 수행하고 있는 IMT-2000의 세부과제(차세대 동영상 구현 단말기용 저소비전력 액정모드의 개발)로 연구되고 있는 반투과형 OCB 모드와 VA 모드, FFS 모드 그리고 Holographic PDLC(HPDLC)에 대한 광학적 설계와 광학특성에 대해 간단히 소개하고자 한다.

II. 본 론

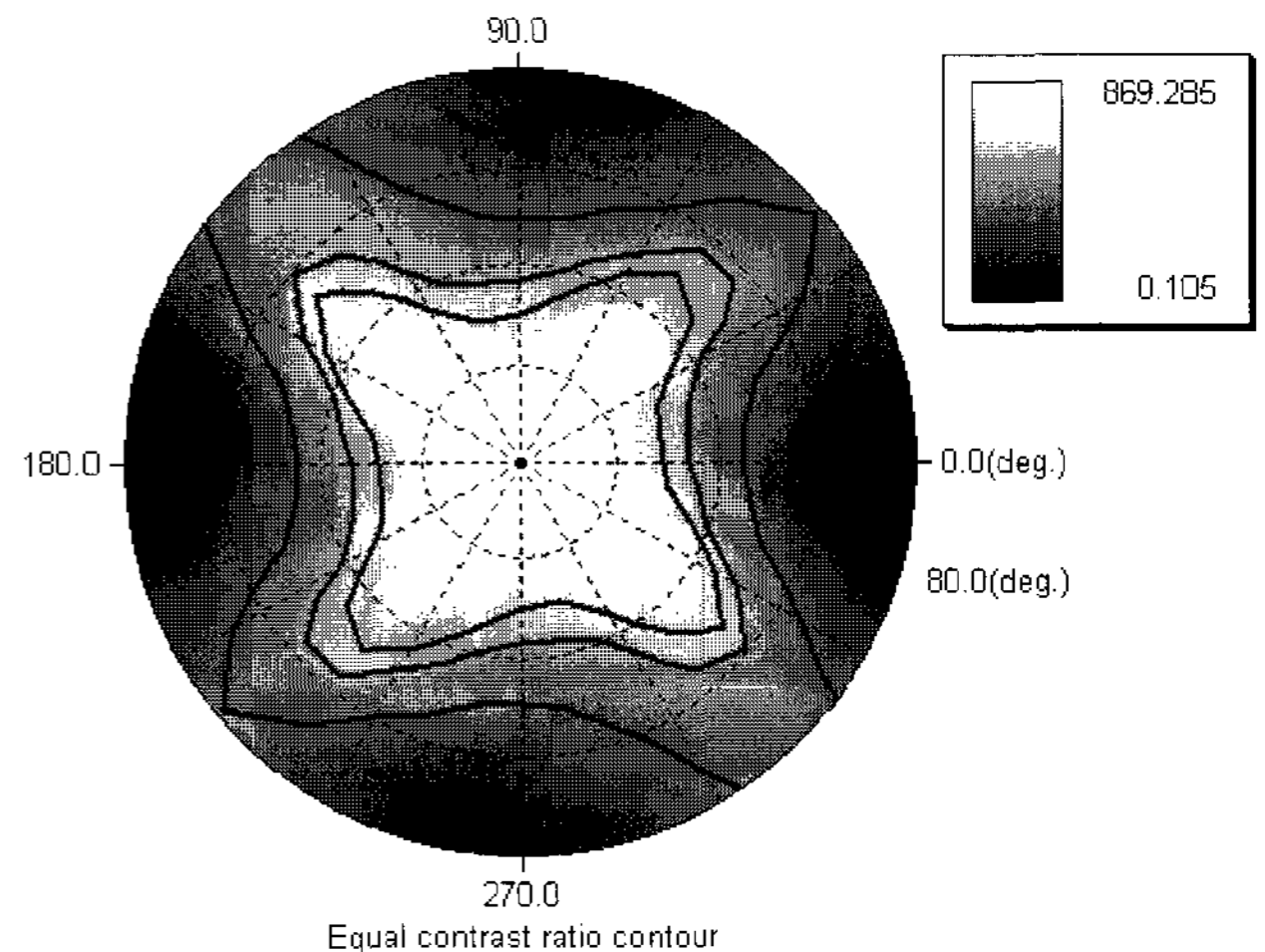
1. OCB 모드를 이용한 반투과형 LCD의 설계

먼저 HAN cell을 multi-domain 구조로 만들어 반투과형 LCD를 구현하였다. 투과율을 높이기 위해 $\lambda/2$ 위상지연을 가지는 액정 셀을 반투과형 LCD 설계에 적용하여 30% 이상의 높은 투과율을 얻을 수 있었다. Multi-domain 방법을 사용했을 때 domain간의 불연속 영역에서 disclination이 발생하여 반사모드와 투과모드에서 빛이 누설되므로 어두운 상태의 광특성이 좋지 않았다. 투과형 위주로 설계된 반사형에서 전압을 인가하여 얻은 $\lambda/4$ 위상지연의 hybrid 구조는 상당히 불안정하여 우수한 시야각 특성을 얻을 수 없었다. 그래서 multi-mode 방법과 negative액정을 이용하여 하나의 셀에 반사부 영역과 투과부 영역을 따로 설계

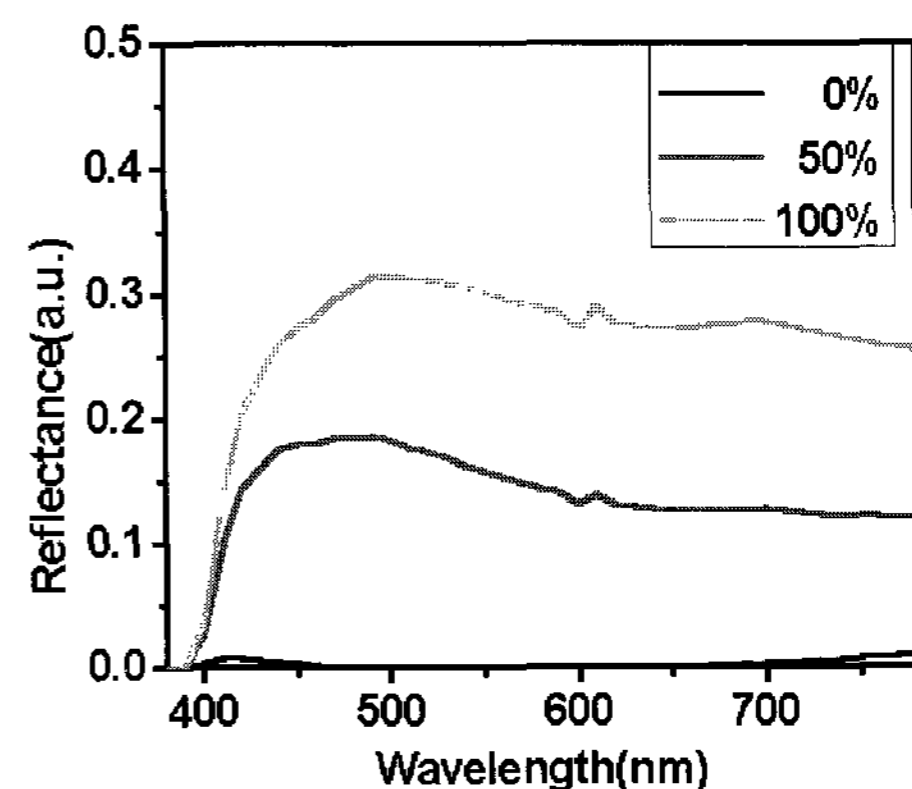
하여 각각의 특성을 얻도록 하였다. [그림 1]에서 보듯 이온빔을 이용해 반사부 모드로는 HAN 셀을 적용시키고, 투과부 모드로는 parallel 러빙된 VA모드를 적용시켜 각각의 모드에서 양호한 특성을 얻어내었다. [그림 2]와 [그림 3]에서 알 수 있듯이 반사 모드는 초기의 안정된 $\lambda/4$ 위상지연의 hybrid 구조를 가지도록 설계하여 multi-domain 방법보다 우수한 시야각 특성을 얻을 수 있었다. 또한 투과 모



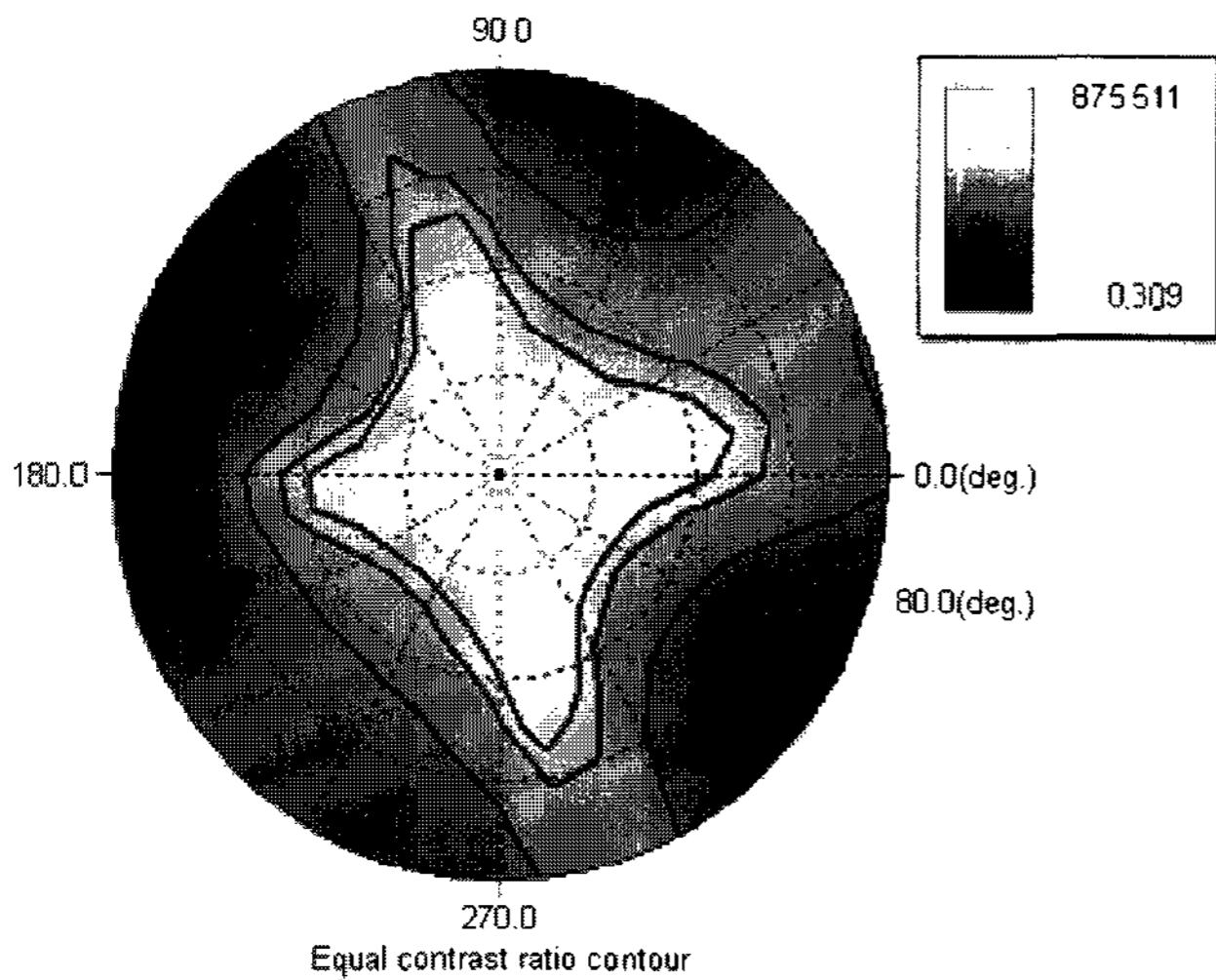
[그림 1] Multimode 방법을 이용한 반투과형 모드 설계



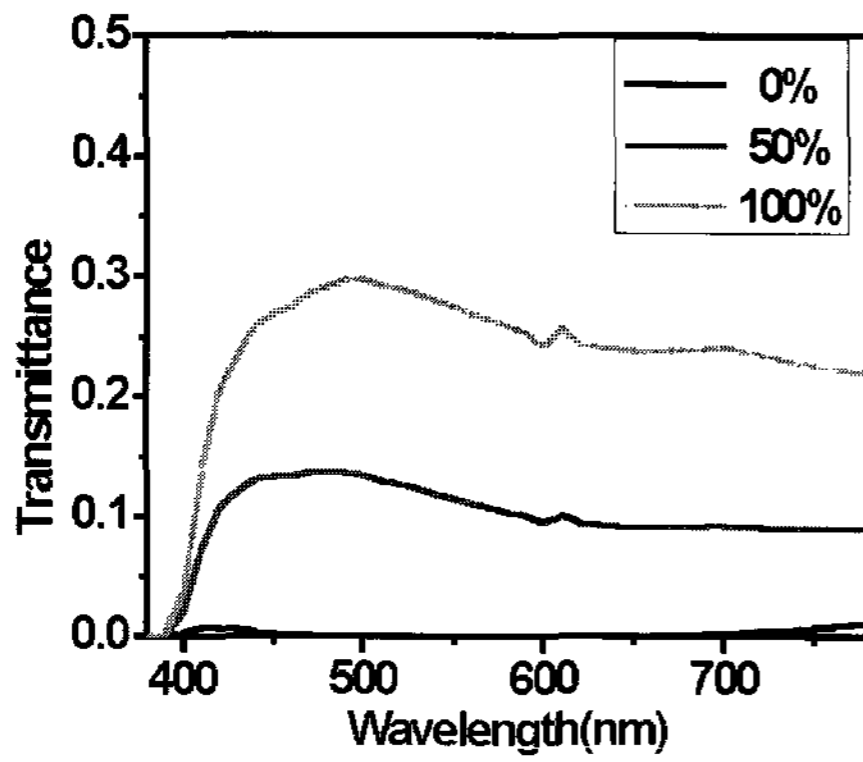
[그림 2] 반사모드의 명암대비비 특성



[그림 3] 반사모드의 분광 특성



[그림 4] 투과모드의 명암대비비



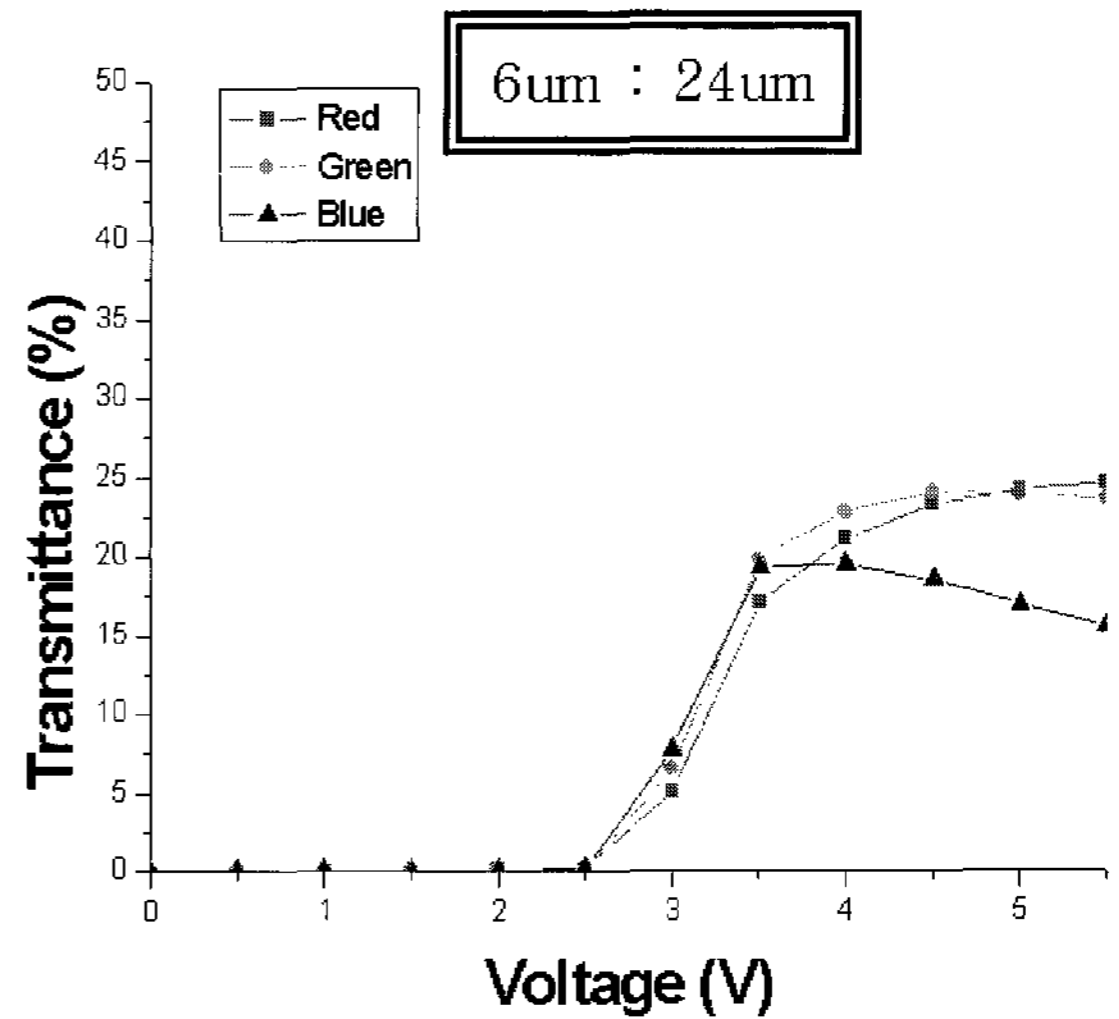
[그림 5] 투과모드의 분광 특성

드는 parallel 리빙하여 전압을 인가하였을 때 splay 구조가 되도록 하여 시야각 특성에서 더욱 양호함을 [그림 4]와 [그림 5]를 통해 알 수 있다. 또한, 투과형 OCB 셀과 반사형 HAN 셀의 응답 속도가 모든 계조에서 10ms 이하로 매우 빠른 응답 속도를 보였다.

2. PVA 모드를 이용한 반투과형 LCD 설계

우수한 시야각 특성 및 광학특성을 얻고, 또한 기존의 반투과 모드와 달리 동일 cell gap과 동일 구동전압으로 반투

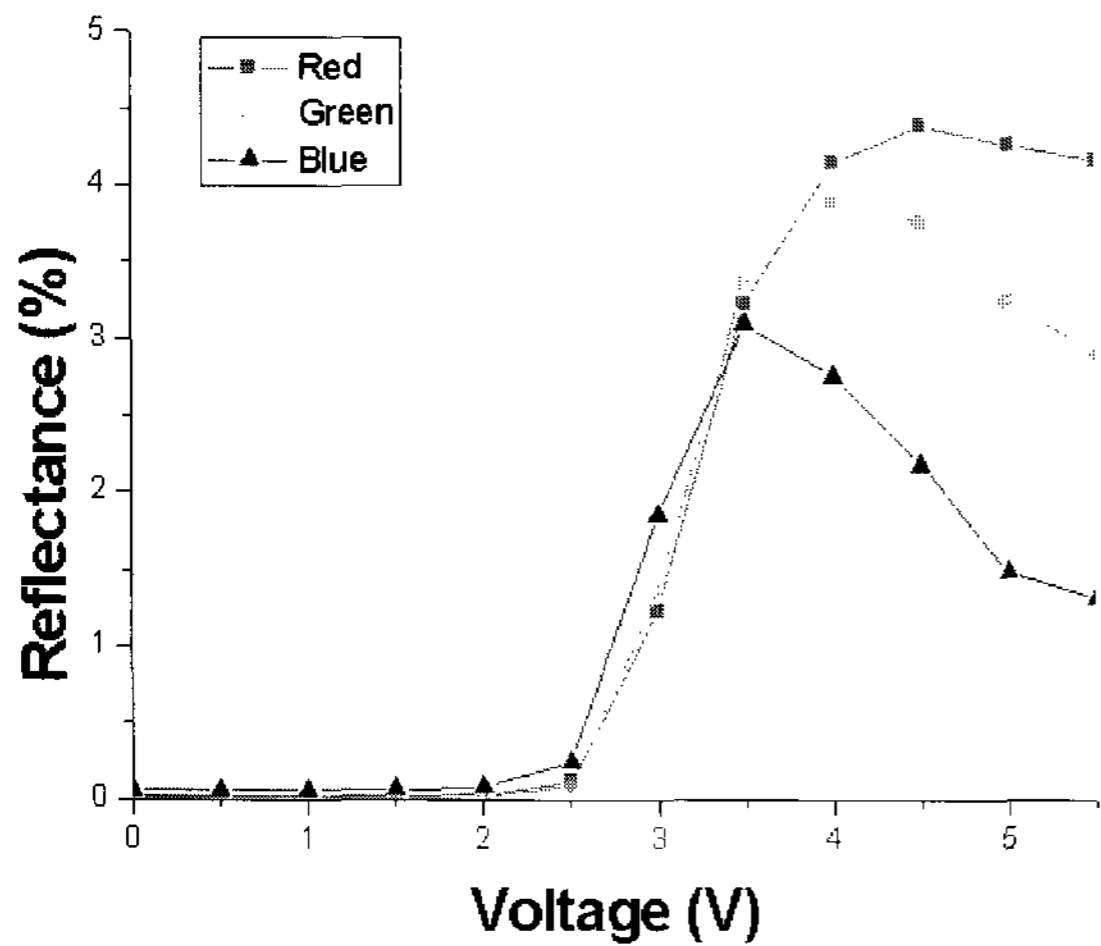
과 모드 구현이 가능하도록 하기 위해 PVA 모드를 적용하여 설계하였다. 먼저 가장 효율적인 전극 구조를 찾아내기 위해 여러 형태의 전극 구조에 대한 액정의 director profile을 얻어내어 retardation을 계산 비교하여 반사 투과 비율을 1:4로 결정하였다. 또한 전극의 구조는 같은 조건하에서 가장 높은 retardation을 얻고, 패널 제작 시 align을 쉽게 할 수 있도록 위판 전극에 패턴을 주지 않았다. 이 결과들을 기본 설계 조건으로 하여, 최적의 패턴 size를 찾아내기 위해 8um : 32um, 6um : 24um, 4um : 16um, 3um : 12um, 2um : 8um 등의 패턴 size에 대한 전기광학 특성을 조사하여 [표 1]에 나타내었다. 또한 시야각 특성을 향상시키기 위해 보상필름으로 negative C-plate를 최적화하여 설계하였다. 그 결과 동일 전압, 동일 셀갭의 최적 설계조건은 cell gap이 3.2um, 액정은 MDA-01-2306 ($\Delta n = 0.1204, \Delta \epsilon = -5$), 패턴 size는 6um : 24um이다. [그림 6-9]는 이 조건으로 설계하였을 때 반사 및 투과모드의 문턱전압과 평균 투과율, 평균 반사율 그리고 시야각 특성을 나타내었는데 반사 및 투과모드의 문턱전압은 약 2 volt이고, 약 4 volt에서 한 픽셀 평균 투과율 24%, 한 픽셀 평균 반사율 4%를 각각 얻을 수 있었으며, 시야각 범위는 반사 및 투과모드에서 상하좌우 약 160 이상임을 simulation을 통하여 확인하였다.



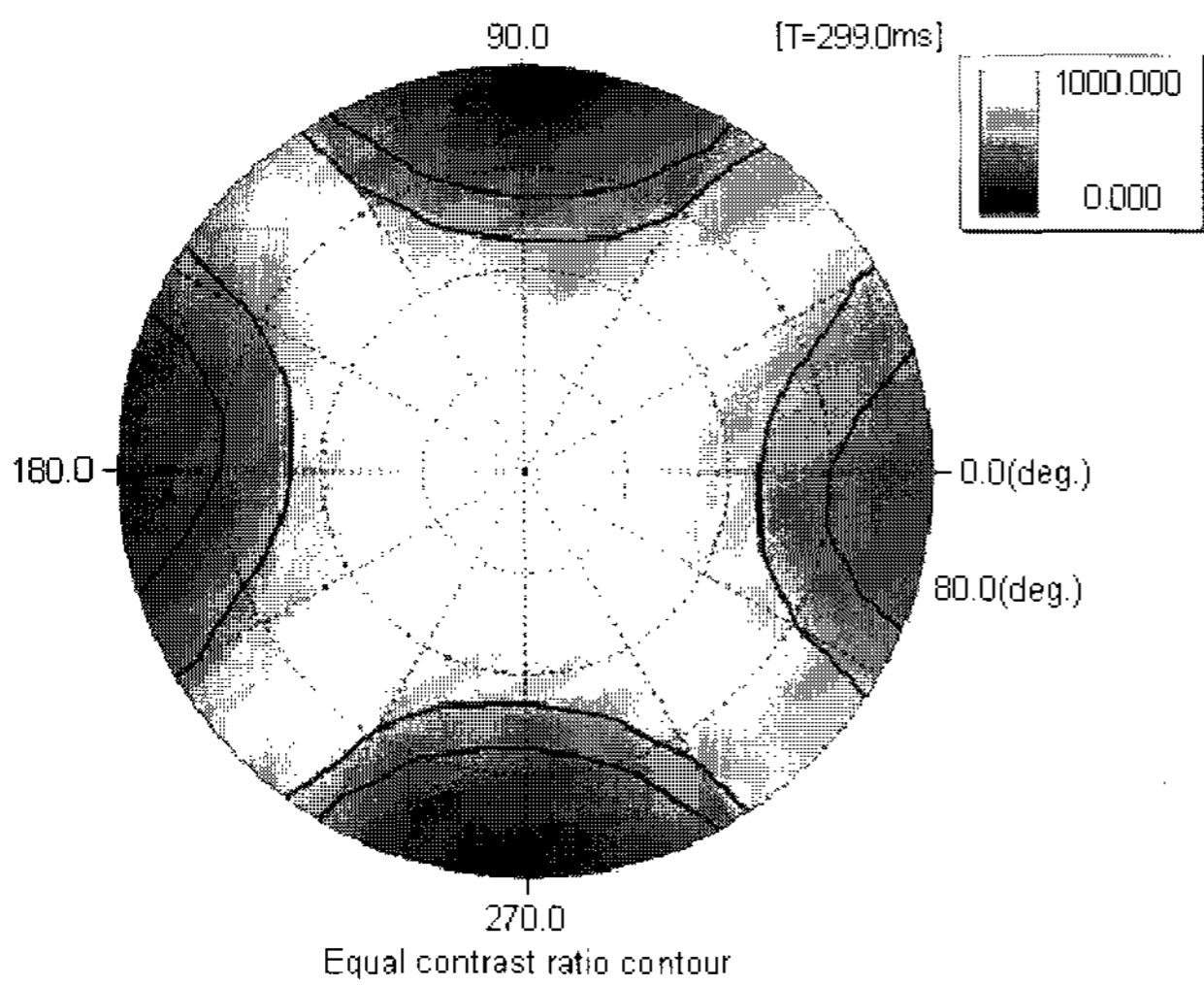
[그림 6] 투과모드의 전기광학 특성

[표 1] 각 패턴 size별 최대 반사 및 투과율

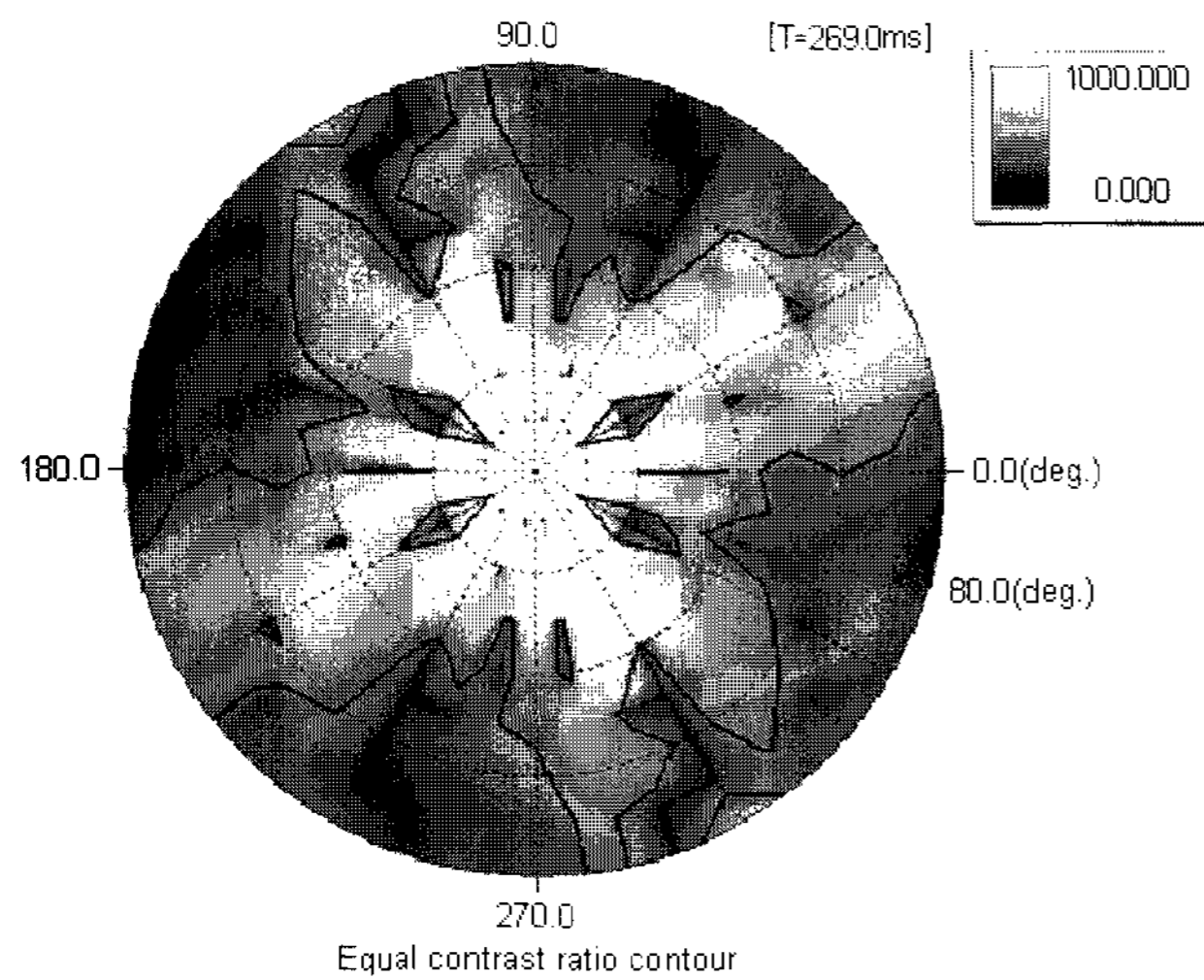
	8um : 32um		6um : 24um		4um : 16um		3um : 12um		2um : 8um	
	V _{sat}	T _{max} (%) / R _{max} (%)	V _{sat}	T _{max} (%) / R _{max} (%)	V _{sat}	T _{max} (%) / R _{max} (%)	V _{sat}	T _{max} (%) / R _{max} (%)	V _{sat}	T _{max} (%) / R _{max} (%)
투과 모드	5 V	25%	4.5 V	23%	5.5 V	25%	5 V	26%	5.5 V	26%
반사 모드	7 V	5%	4 V	4%	4 V	3%	4 V	4%	4.5 V	1%



[그림 7] 반사모드의 전기광학 특성



[그림 8] 6um : 24um 패턴 구조에서 투과 모드에서 시야각 특성

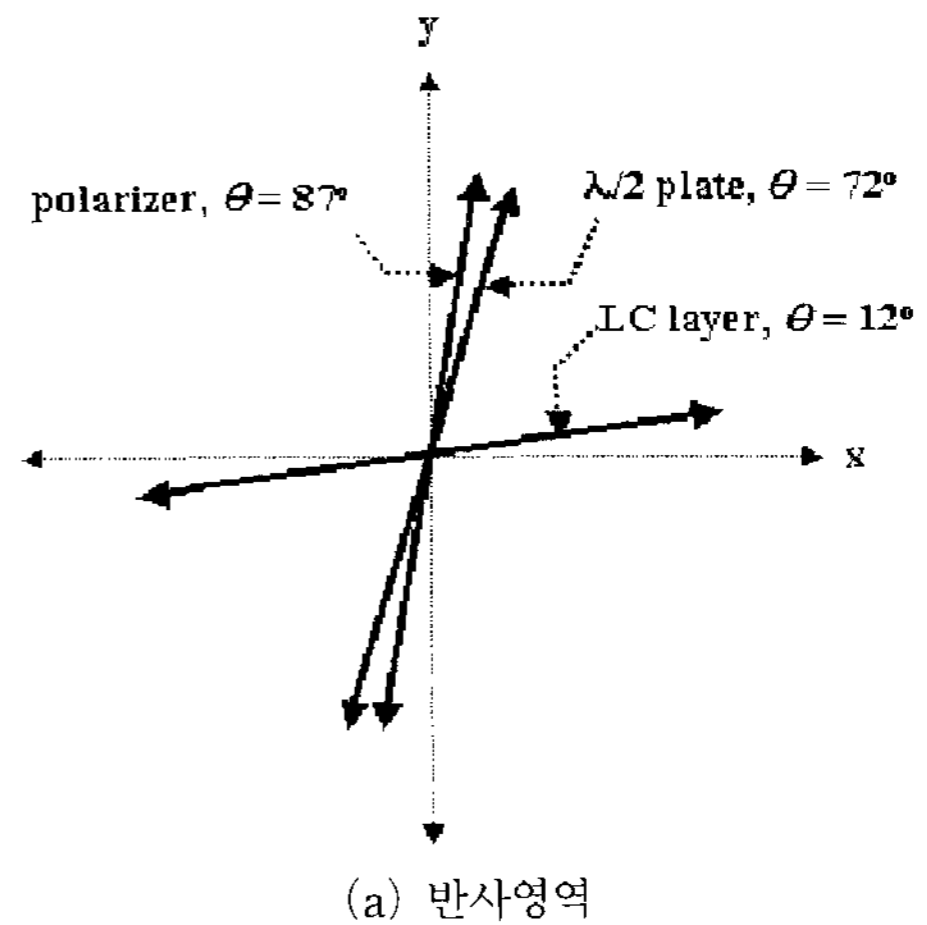


[그림 9] 6um : 24um 패턴 구조에서 반사 모드에서 시야각 특성

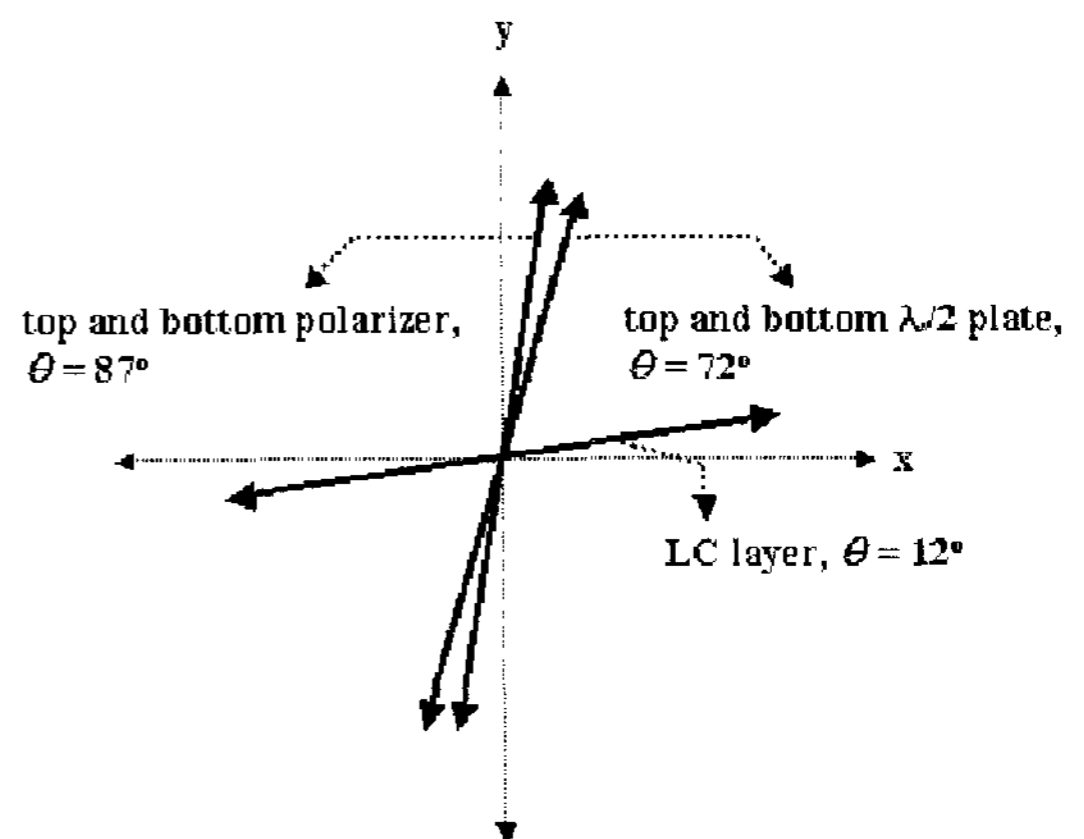
3. Fringe-Field 구동형 반투과형 LCD

액정 방향자를 기판에 평행하게 회전시키면서 셀의 위상

지연값을 변화시키는 프린트 필드 구동형 반투과형 액정 디스플레이를 개발하였다. 연구 결과로는 프린지 필드 구동형 수평배향셀의 경우 Normally black 셀 구조를 설계 하였고 [그림 10]과 [그림 11]에 셀의 구조 및 전기광학특성을 나타내었다. 셀 구조는 프린트 필드를 형성할 수 있는 전극 구조에 반사영역의 경우 편광판, $\lambda/2$ 위상지연필름, 수평배향 액정셀($\lambda/4$), 반사판으로 구성되어 있고, 투과영역의 경우 편광판, $\lambda/2$ 위상지연필름, 수평배향 액정셀($\lambda/2$), $\lambda/2$ 위상지연필름, 편광판으로 구성되어 있다. 전기광학 특성을 보면 구동 전압은 반사 영역과 투과 영역에서 각각 5.9V와 4.7V이고, 어둠 상태의 파장 분산성은 필름과 액정셀이 특정각을 이룸으로써 전파장에 대해서 광대역 $\lambda/4$ 필름이 되어 반사영역 및 투과영역 모두 우수한 어둠상태를 보여주었다. 또한 전압 인가 시 액정들이 수평으로 회전하기 때문에 수직으로 회전하는 액정 모드에 비해 밝음 상태에서의 파장 분산성이 매우 적다. 시야각 특성으로는 CR이 5이상인 영역은 반사 영역에서 전 방향 55° 정도이며, 투과 영역에서는 수직 방향으로 100° 정도, 수평 방향으로는 110° 정도이다. FFS 모드를 이용한 반투과형 액정 디스플레이가 우수한 전기광학 특성을 보이지만 반투과형 제작 시, 현재 상용화되고 있는 액정의 n이 가장 작은 것은 대략 0.067 정도이기 때문

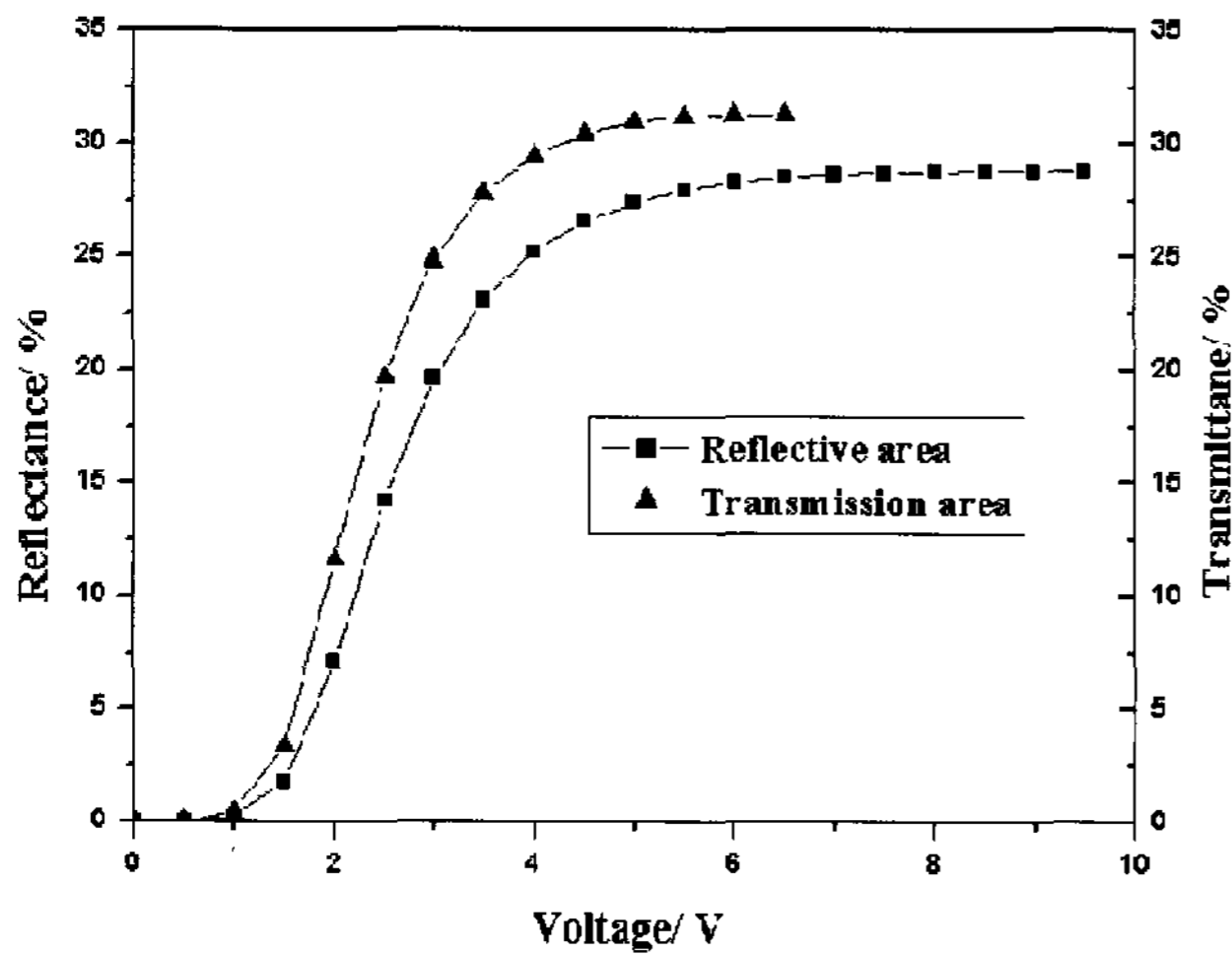


(a) 반사영역



(b) 투과영역

[그림 10] FFS 모드의 반투과형 셀구조



[그림 11] 입사 파장이 550 nm일 때, 전압에 따른 반사율 및 투과율

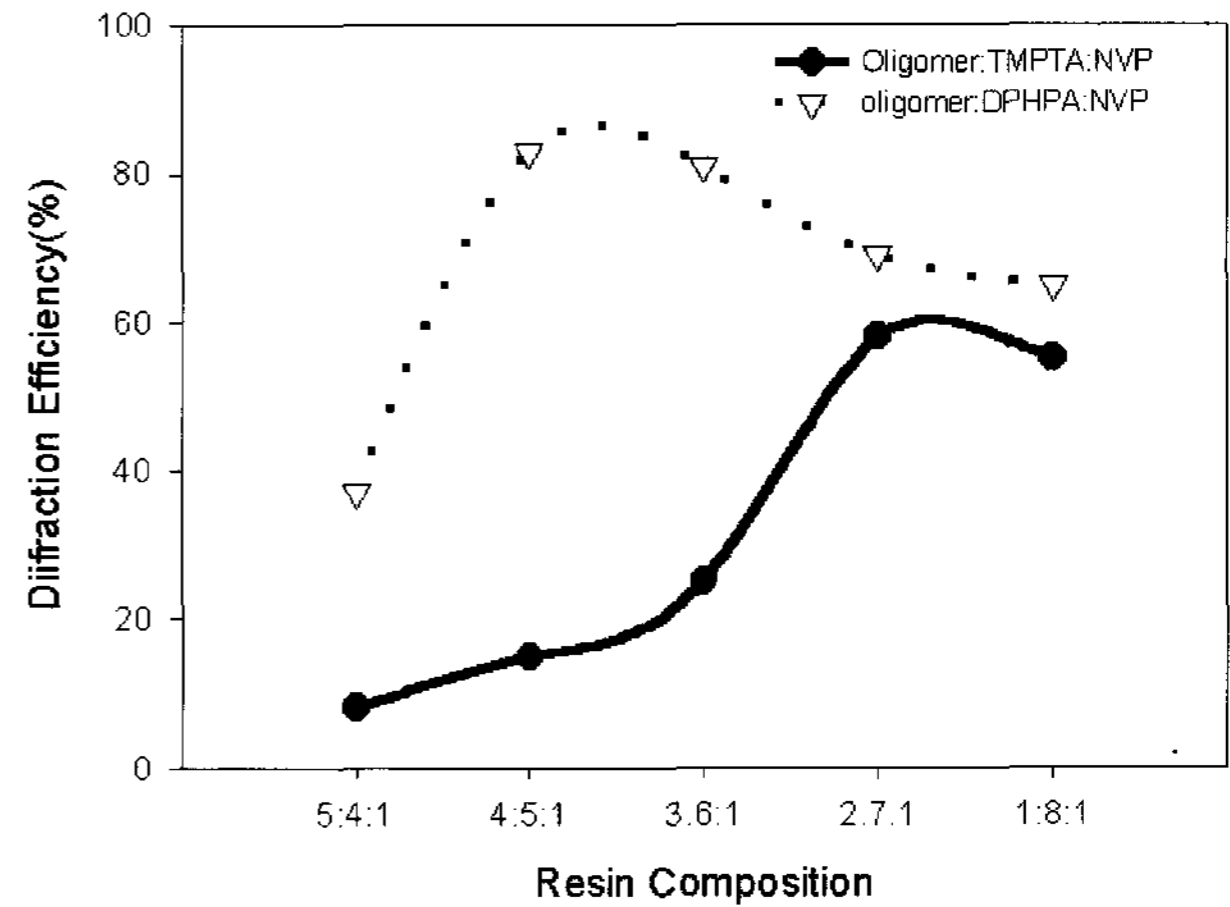
에 반사 영역에서 액정셀의 위상지연값인 $\lambda/4$ 를 만족하기 위해서는 $2.3 \mu\text{m}$ 이하의 매우 낮은 셀갭을 요구한다. 이러한 단점을 보완하기 위해 실제 액정셀의 위상지연값은 $0.289 \mu\text{m}$ 이면서 정면의 유효 위상지연값 $\lambda/4$ 인 프린지 필드 구동형 hybrid aligned nematic(HAN)을 반사형에 적용한 연구가 진행되고 있다.

4. 회절효율 향상과 각도 선택도를 향상시키기 위한 HPDLC의 분자설계

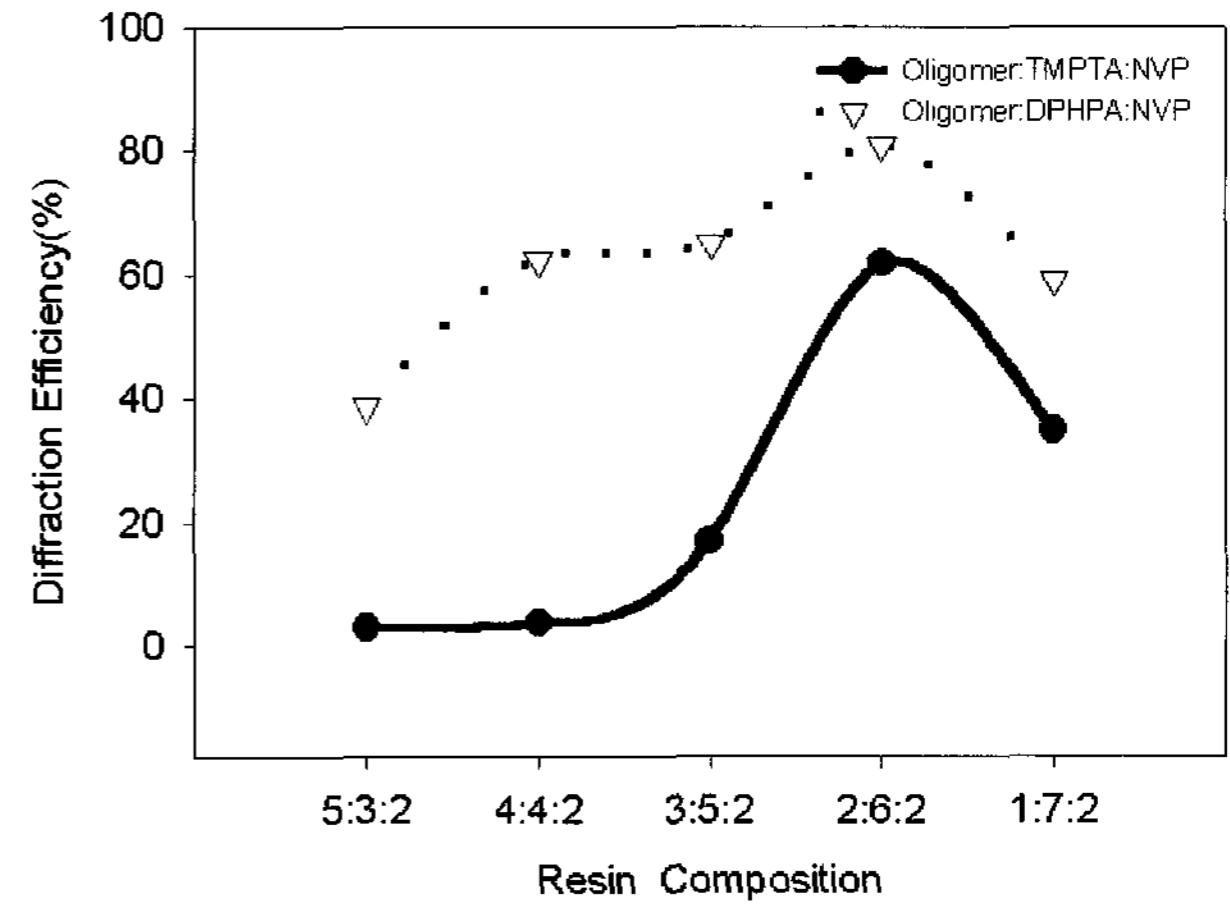
홀로그래픽 고분자분산액정복합막은 볼륨 홀로그래피 원리를 고분자분산액정복합막에 적용함으로써 수지와 액정이 조사광의 파장과 입사각에 의해 결정되는 특정간격의 grating을 형성하여 입사광을 선택적으로 회절, 반사시키는 광학 디바이스이다. 본 연구에서는 기존의 5가계 아크릴레이트계에 PUA를 도입한 결과 80% 이상의 높은 회절 효율을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 이는 구조제어를 통해 합성된 PU oligomer가 망목구조를 갖는 acrylate domain을 연결하는 연결분자(tie molecule)의 역할을 하여 수지상의 탄성률을 증가시킴으로써 수지와 액정상의 상분리 증가에 따라 보다 완벽한 grating이 형성된데 기인한 것으로 보인다. 본 실험결과 5가계의 경우 4:5:1에서 80% 이상, 3가계의 경우는 2:7:1에서 60%의 회절효율을 얻을 수 있었는데, 이는 수지의 평균 관능기가 증가함에 따라 가교점 사이의 분자량(M_c)이 감소하고, 수지상의 탄성률이 증가하여 squeezing에 의한 polymer-LC의 상분리(pressure diffusion)를 가속화한데 기인한다. 이러한 예측은 다음의 이상고무 이론에서 고무상탄성율(G_N^0)이 M_c 에 반비례한다는 점과 일치함을 확인하였다.

그리고 매트릭스 수지의 분자 구조제어를 통한 광전특성의 최적화를 위하여 유리전이온도, 가교도, 액정과액의 interaction의 최적제어, 액정 비율의 극대화, cell 두께를 제어하여 저구동전압과 고응답성 홀로그래픽 격자를 생성하였다. 이를 통해 액정-고분자간의 interaction이 클수록 미세한 상분리, 높은 구동전압, 긴 rising time, 짧은 decay

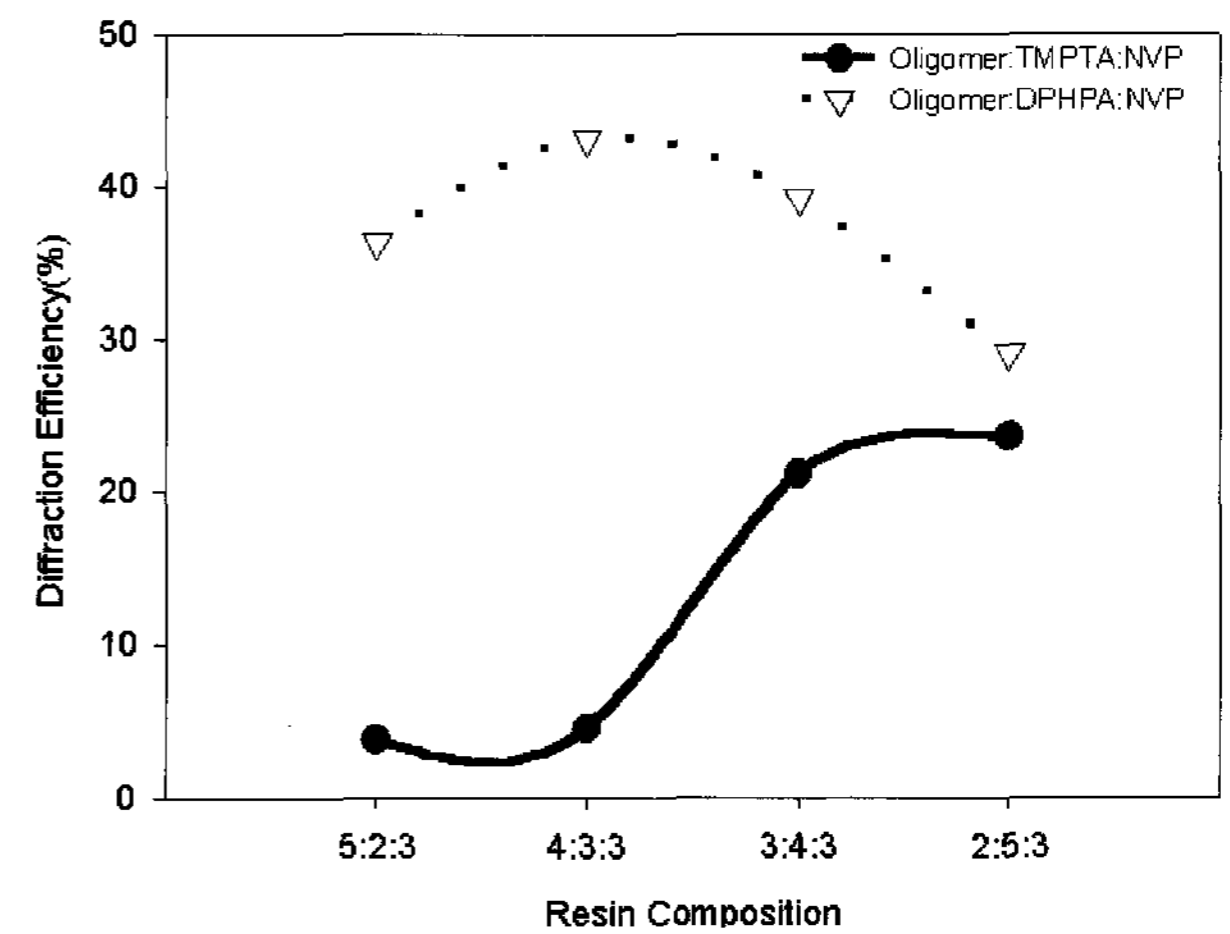
time의 특성을 나타내며, 화학적 친화력이 같더라도 수지의 유리전이 온도가 낮을수록 고분자와 액정 분자간의 anchoring energy가 낮아져 구동전압이 감소함을 알 수 있었다. 이상과 같이 본 연구에서는 [그림 12]에서 확인할 수 있듯



(a)



(b)



(c)

[그림 12] HPDLC 필름의 다양한 resin 성분비에 따른 회절 효율 (35 wt%LC, 50 mW/cm²)

polymer의 구조제어 및 광중합 조건을 적절히 제어함으로써 회절효율 80% 이상, 수축률 5% 이하의 투과형 HPDLC film의 제작이 가능하였으며 matrix의 shrinkage를 최소화하기 위해 oligomer에 silica를 첨가하여 수축률을 극소화하고 surfactant와 불소가 치환된 diluent로 구동전압을 낮추기 위한 지속적인 실험을 진행하고 있다.

III. 결 론

우수한 시야각 특성 및 광학특성을 얻고, 새로운 수준의 반투과 모드인 동일 cell gap과 동일 구동전압으로 반투과 모드 구현이 가능하도록 하기 위해 OCB, PVA, FFS 모드를 적용하여 설계하였다. 설계 결과 이들 모두 우수한 시야각 특성 및 광특성을 나타내어 향후 제품화 요구조건을 충족시켰다.

polymer의 구조제어 및 광중합 조건을 적절히 제어함으로써 회절효율 80% 이상, 수축률 5% 이하의 투과형 HPDLC film의 제작이 가능하였으며 낮은 구동전압을 위한 지속적인 연구를 수행중이다.

현재 반투과형 VA모드는 삼성전자에서 기술개발에 집중적으로 투자하여 상품화 단계까지 온 상황이며, OCB 모드도 고속응답 특성의 장점 때문에 삼성전자, LG. Philips LCD에서 그리고 학계에서 꾸준히 관심을 가지고 지속적인 연구가 이루어지고 있고, 조만간 상품화가 이루어질 전망이다. 그러므로 선진기술의 축적을 위해 이 두 모드에 대한 지속적인 연구와 기술개발이 이루어져야 한다. 그리고 HPDLC의 연구결과 차세대 디스플레이로서의 잠재적 응용이 크게 기대되므로 미래 원천기술 개발의 차원에서 국내에서도 지속적인 연구 환경이 형성되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] H-I. Back, Y-B. Kim, K-S. Ha, D-G. Kim, S. B. Kwon, IDW'00, pp. 41, 2000.
- [2] M. Jisaki and H. Yamaguchi, IDW'01, pp. 133, 2001.
- [3] T. Maeda, T. Matsushima, E. Okamoto, H. Wada, O. Okumura, and S. Iino, J. SID 7, pp. 9, 1999.
- [4] W. S. Park, B. J. Baek, K. Y. Han, T-H. Yoon, and J. C. Kim, ILCC'02, pp. 710, 2002.
- [5] S. J. Roosendaal, B. M. I. van der Zande, A. C. Nieuwkerk, C. A. Renders, J. T. M. Osenga, C. Doornkamp, E. Peeters, J. Bruinink, J. A. M. M. van Haaren, S. Takahashi, SID'03, pp. 78, 2003.
- [6] F. Zhou, D.-K. Ynag, SID'03, pp. 82, 2003.
- [7] Y.-P. Huang, M.-J. Su, H. -P.D. Shieh, S.-T. Wu, SID'03, pp. 86, 2003.
- [8] M. Shibazaki, Y. Ukawa, S. Takahashi, Y. Iefuji, T. Nakagawa, SID'03, pp. 90, 2003.
- [9] J.C. Jones, P. Worthing, G. Bryan-Brown, E. Wood, SID'03, pp. 190, 2003.
- [10] B. M. I. van der Zande, A. C. Nieuwkerk, M. van Deurzen, C. A. Renders, E. Peeters, S. J. Roosendaal, SID'03, pp. 194, 2003.
- [11] C. G. Jhun, J.-W. Kang, T.-H. Yoon, J. C. Kim, SID'03, pp. 198, 2003.
- [12] S. H. Lee, M. K. Chang, T-H. Yoon, J. C Kim, Jpn. J. Appl. Phys, 42, pp. 5127, 2003.
- [13] S. H. Lee, T. J. Kim, G-D. Lee, T-H. Yoon, J. C. Kim, Jpn. J. Appl. Phys, 42, pp. L1148, 2003.
- [14] T. B. Jung, J. C. Kim, S. H. Lee, Jpn. J. Appl. Phys, 42, 2003.
- [15] P. S. Drzaic, Liquid crystal dispersions, World Scientific, Singapore, 1995.
- [16] G. P. Crawford et al., Proceedings of SID'96, pp. 99, 1996.
- [17] M. D. Sarkar, J. Qi, and G. P. Crawford, Polymer, 43, pp. 7335, 2002.
- [18] R. T. Pogue, L. V. Natarajan, S. A. Siwecki, V. P. Tondiglia, R. L. Sutherland, and T. J. Bunning, Polymer, 41, pp. 733, 2000.
- [19] M. J. Escuit, P. Kossyrev and G. P. Crawford, Applied Physics Letter, 76, pp. 2235, 2000.
- [20] G. Saitoh, H. Murai, S. Uehara, T. Gotoh, K. Mimura, T. Nakata, K. Sumiyoshi, and H. Hayama, Proceedings of SID'01, pp. 344, 2001.
- [21] Y. H. Cho, B. K. Kim, and K. S. Park, Polymer International, 48, pp. 1085, 1999.
- [22] G. T. Warren, M. Desarker, J. Qi, and G. P. Crawford, Proceedings of SID'01, pp. 866, 2001.
- [23] M. D. Schulte, S. J. Clarson, L. V. Natarajan, V. P. Tondiglia, D. W. Tomlin, and T. J. Bunning, Abstr. Pap. Am. Chem. Soc., 2, pp. 208, 2000.
- [24] M. D. Schulte, S. J. Clarson, L. V. Natarajan, D. W. Tomlin, and T. J. Bunning, Liq. Cryst., 27, pp. 467, 2000.
- [25] M. D. Schulte, S. J. Clarson, L. V. Natarajan, D. W. Tomlin, T. J. Bunning, Mol. Cryst. Liq. Cryst., 373, pp. 80, 2002.
- [26] H. F. Mark, N. M. Bikales, C. G. Overberger, G. Menger, Encyclopedia of Polymer Science and Engineering, Wiley, New York, 256, 1987.
- [27] B. K. Kim, Y. C. Jeon, and J. C. Kim, Mol. Cryst. Liq. Cryst., 326, pp. 319, 2000.
- [28] Whitehead Jr., SPIE Proc., 4107, pp. 198, 2000.
- [29] R. L. Sutherland, L. V. Natarajan, V. P. Tondiglia, T. J. Bunning, and W. W. Adams, SPIE Proc., 2152, pp. 303, 1994.