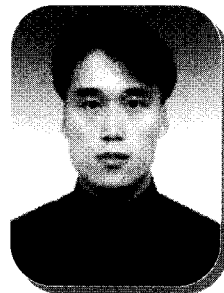


유기 평판 디스플레이 기술과 LCD 기술의 최근 동향



· 이신두 ·
서울대 공과대학
전기컴퓨터공학부 교수



· 유창재 ·
서울대 공과대학
전기컴퓨터공학부 박사과정

1. 서론

정보의 교류가 산업 및 사회의 근간으로 자리잡게 된 현대의 고도 정보화 사회에서는, 인간과 전자기기 간에 막대한 양의 정보가 전달되고 있다. 이러한 정보의 교류에서 “사람과 기계간의 인터페이스”의 가교 역할을 수행하는 디스플레이는 점점 더 그 중요성이 더해지고 있다. 2002년 한일 월드컵에서 보여주었던 우리나라 국민을 하나로 모아주었던 길거리 응원은 광화문 사거리와 시청 앞 광장 등에 설치된 대형 스크린이 있었기에 가능한 것이었다. 이러한 디스플레이의 중요성을 반영하듯 cathode ray tube(CRT)와 평판 디스플레이(flat panel display : FPD)를 포함한 정보 디스플레이 관련 산업의 올해 매출 규모는 세계적으로 500억 달러에 이를 것으로 예상되며 해마다 증가할 것으로 기대된다 [1]. 실제로, 전자부품 관련 세계 시장에서 전자 디스플레이의 시장 규모는 반도체의 뒤를 이을 만큼 증가했다.

21세기 고도 정보화 사회에서 인간의 사회적 활동범위는 더욱 더 늘어남에 따라, 모든 분야에서 “언제든지”, “어느 곳이든지”, “누구든지” 인간의 시각을 통해서 필요한 정보를 보다 빠르고 알기 쉬운 형태로 받아 보는 것이 요구된다. 이러한 요구를 충족시키기 위한 디스플레이는 휴대가 가능하도록 얇고 가벼워야 하며, 소비전력이 작을 뿐만 아니라, 영상신호 및 컴퓨터 데이터를 모

두 표시할 수 있어야 한다. 또한 정보사회의 고도화에 따른 정보량의 급속한 팽창으로 보다 많은 정보를 표현할 수 있는 대면적 디스플레이 연구의 필요성이 한층 고조되었다.

정보 디스플레이에 대한 새로운 요구에 따라 오랫동안 정보 디스플레이 시장을 주도해 온 CRT는 현재 성장세가 둔화되어 액정 디스플레이 (liquid crystal display : LCD)가 주도하는 FPD와의 경쟁에서 더 이상 비교우위를 차지할 수 없게 되었다. 더욱이 개인 휴대통신 단말기와 노트북 컴퓨터 보급의 일반화, 박막 트랜지스터 (thin film transistor : TFT) LCD 기술의 비약적인 발전은 FPD의 경쟁적 우위를 가능하게 했다. 현재 TFT LCD는 고품질 대형화에 따라 이미 컴퓨터 모니터 시장에서 CRT를 대체하고 경쟁하고 있으며 플라즈마 디스플레이 (plasma display panel : PDP)와 함께 고선명 텔레비전 (high definition television : HDTV) 분야로 시장을 확대하고 있다. 유기발광 다이오드 (organic light emitting diode : OLED)를 이용한 디스플레이는 대비비와 시야각 특성이 우수한 발광형 디스플레이로써 최근 활발한 연구가 진행되고 있어 향후 TFT LCD와 경쟁할 것으로 전망하고 있다 [2].

본 고에서는 최근 사회 경제적 파급 효과가 확대된 유기 FPD 분야에 대해 기술하고자 한다. 먼저, 대표적인 유기 FPD 기술인 LCD와 OLED 디스플레이에 대해 논의하고 차세대 디스플레이 기술인 유기 TFT를 이용한 전유기 디스플레이 (all organic display :

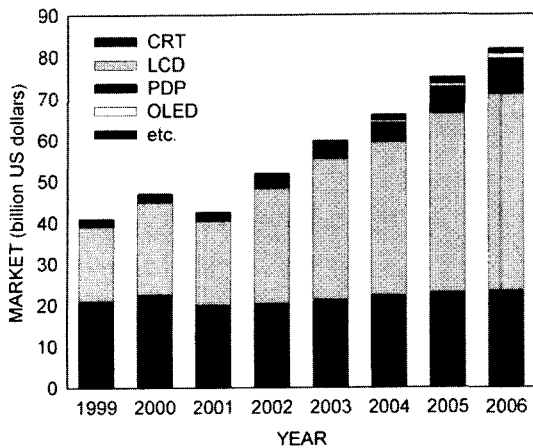


그림 1. 정보 디스플레이 분야의 시장 규모[1].

AOD) 기술에 대해 간단히 기술할 것이다. 또한, 현재 FPD 시장을 주도하고 있는 LCD의 최근 기술과 연구 동향에 대해 광시야각화 기술과 고속응답화 기술로 나누어 기술하고자 한다.

2. 유기 평판 디스플레이

평판 디스플레이는 사용하는 광원에 따라 자체적으로 빛을 내는 발광형(emissive) 디스플레이와 외부의 광원을 이용하여 정보를 표시하는 수광형(nonemissive) 디스플레이로 나눌 수 있다. 발광형 FPD로는 대표적으로 PDP와 (OLED)가 있고 수광형 FPD로는 LCD가 대표적이다. 본 장에서는 유기 재료를 사용하는 수광형 디스플레이인 LCD와 발광형 디스플레이인 OLED에 대해서는 논의하고 차세대 AOD 기술에 대해 소개할 것이다.

2.1 액정 디스플레이(LCD)

최초에 액정 상이 발견된 이후에 액정의 전기광학적 특성에 대한 이론적인 연구를 거쳐 1960년대에 들어서 액정의 전기광학 효과에 대한 실험적인 연구 결과가 다양하게 진행되었다[3-6]. 특히, 비틀린 네마틱 액정(twisted nematic LC : TN-LC)에서의 전기광학적 특성에 대한 연구[5]와 초비틀린 네마틱 액정(supertwisted nematic LC : STN-LC)을 이용한 액정 디스플레이에 대한 연구[7]는 능동행렬(active matrix : AM) 구동방식[8]과 함께 향후 LCD 분야의 비약적인 발전에 결정적인 역할을 하였다.

초기에 행렬구동(matrix-addressing) 방식을 적용한 TN-LCD는 전기광학 투과도 곡선이 비교적 완만하여 패널에서 구동할 수 있는 행의 수가 제한되어 주로 소형 손목시계나 계산기에 활용되었다. 1980년대 중반에 이르러, Scheffer 등에 의해 STN-LCD 모드가 제안되면서 고용량 정보표시가 가능해졌다[7]. STN-LCD 모드에서는 가파른 전기광학 투과도 곡선을 얻을 수 있어 많은 수의 행을 구동할 수 있어서 수동행렬(passive matrix) 구동 방식으로 많은

정보를 하나의 패널에 표시할 수 있게 되었으며 기존의 TN-LCD 방식보다 넓은 시야각 특성을 얻을 수 있었다.

1970년대 초에 제안된 AM 구동 방법은 각 화소에 전체 화면의 한 frame 동안 정해진 수준의 전압이 유지되는 metal-insulator-metal 또는 TFT와 같은 능동 소자를 연결하여 구동하는 방식으로 기존의 수동행렬 구동방식을 적용한 STN-LCD 모드보다 화질이 우수하였으나 상대적으로 원가 부담이 커서 가격 경쟁에서 불리했다. 하지만 최근까지 TFT 기술의 비약적인 발전과 안정된 양산기술의 확보로 현재는 TFT LCD가 LCD 시장의 80% 이상을 점유하고 있다[1].

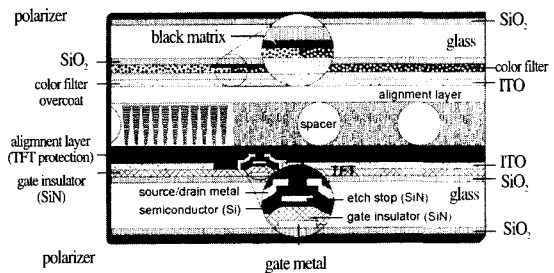


그림 2. TFT TN-LCD 기본 구조의 단면도[9].

현재 폭 넓게 사용되고 있는 TFT TN-LCD의 기본 구조를 그림 2에 나타내었다. 액정 패널은 각각 TFT와 color filter가 형성된 두 장의 유리 기판에 액정 배향막을 도포하고 러빙한 후, 두 장의 기판을 서로 붙여 제작된다. 제작된 기판에 액정을 주입하고 직교 편광자 사이에 고정시킨 후, 구동 회로를 연결하면 LCD 패널이 완성된다. LCD는 자체적으로 빛을 낼 수 없으므로 외부에 별도의 광원(back light unit)이 필요하다. 그러므로 LCD 패널은 TFT 구동에 의해 투과하는 빛의 양을 조절하는 역할을 하게 된다.

일반적으로 액정물질은 긴 막대 형태거나 원판형 분자로 액정 분자의 정렬방향에 따라 광학 이방성(optical anisotropy)을 나타낸다. 그러므로 편광된 빛의 편광 방향과 액정 분자의 정렬방향에 따라 액정 층을 통과하는 빛의 두 normal modes는 다른 위상차를 경험하게 되어 반대쪽 편광자의 상대적 방향차에 의해 다른 투과도를 나타내게 된다.

먼저, 전기장이 인가되지 않았을 때 밝은 상태를 나타내는 normally white 모드에 대해 설명하면, 그림 2에서 전기장이 인가되지 않았을 때, 액정 방향자(director)의 패널 수직방향으로의 분포는 카이랄 첨가제(chiral dopant)와 배향막의 러빙효과에 의해 90도 만큼 균일하게 비틀린 구조를 이루게 된다. 액정 방향자가 균일하게 비틀린 구조를 이루고 있을 때, 입사면의 방향자 방향으로 입사한 선형 편광된 빛은 Mauguin 조건에서 액정의 방향자를 따라 회전하여 반대쪽의 직교 편광자를 통해 투과하게 된다. 투과된 빛은 color filter에 의해 해당하는 색을 표현하게 된다. 전기장이 인가되면, 양의 유전 이방성(dielectric anisotropy)을 갖는 액정 분자의

방향자는 Fredericksz 문턱전압 (threshold voltage)[10] 이상에서 전기장의 방향에 평행하도록 회전을 하게 된다. 액정 패널에 충분한 전기장이 인가되면 액정 방향자는 패널에 수직하게 배열하게 되어 액정 층은 등방적인 (isotropic) 광학 특성을 보이게 된다. 이러한 액정 층을 통과하는 선형 편광된 빛의 편광은 변하지 않으므로 직교 편광자 (crossed polarizers)에서 어두운 상태를 나타낸다.

Normally black 모드는 그림 2에서의 같은 구조에서 두 편광자를 평행하게 했을 때 얻어지는 광학 특성으로, normally white 모드와 반대의 특성을 보인다. 그림 3은 normally white 모드와 normally black 모드 TN-LCD의 전기광학 투과도 특성을 나타낸 것으로 문턱전압 이상에서 선형적인 투과도 특성을 보이므로 연속적인 계조 (gray scales)를 표시할 수 있다.

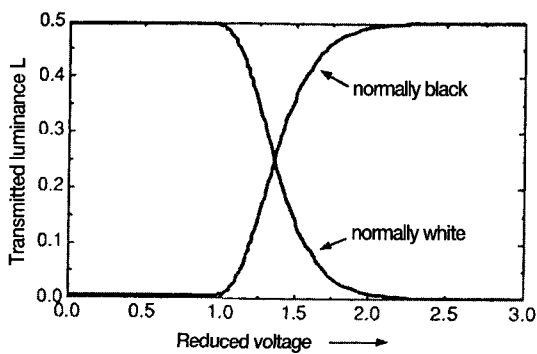


그림 3. TN-LCD의 전기광학 투과도 특성.

2.2 유기 발광 다이오드(OLED) 디스플레이

구조가 LCD에 비해 간단하고 전력소모가 작은 OLED는 자체 발광 특성을 가지고 있으므로 고휘도의 넓은 시야각과 빠른 응답 속도의 디스플레이로 향후 LCD를 유력한 경쟁 상대로 발돋움하고 있다. 유기 전계발광 다이오드 (organic electroluminescent diode)의 고휘도화에 대한 Tang 등의 연구[11] 이후에 디스플레이 응용에 대한 활발한 연구가 진행되었다. 또한, 구부릴 수 있는 형태[12] 또는 투명한 형태[13]의 OLED도 제안되면서 차세대 디스플레이로서 가능성을 제시하였다. 1990에 Burroughes 등[14]에 의해 고분자 poly(p-phenylene vinylene)(PPV)에서 전계발광(electroluminescent : EL) 현상이 발견된 이후 고분자 전계발광 소자(polymer electroluminescent device : PLED)에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있다.

OLED의 기본 구조는 그림 4에 나타내었다. 일함수가 낮은 전극을 음극(cathode)으로 하고 일함수가 높은 전극을 양극(anode)으로 하여 발광 층(emitting layer)에서 빛이 튀어나올 수 있도록 양극은 투명한 indium-tin-oxide(ITO)로 전극을 형성한다. 양 전극 사이에 전자와 정공을 주입하고 전달할 전자/정공 주입 층(electron/hole injection layer)과 전자/정공 전달 층(electron/hole transport layer), 그리고 전계발광에 의해 빛을 내는 발광 층(emitting layer)을 그림과

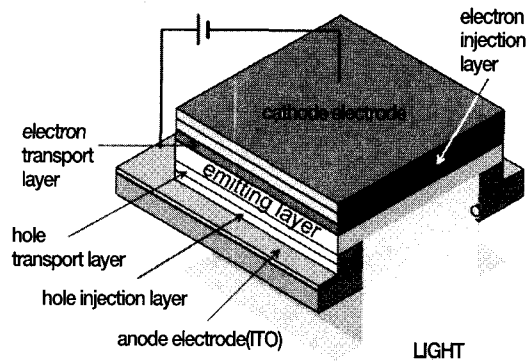


그림 4. OLED의 기본 구조.

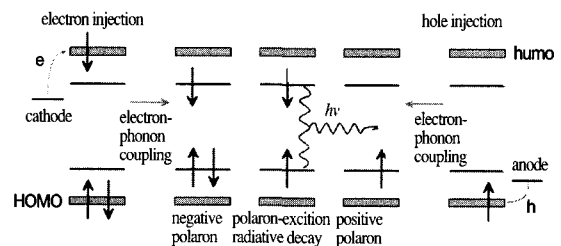


그림 5. OLED에서 전계 발광 메커니즘[18].

같이 차례로 쌓아서 OLED를 제작한다. 무기 발광 다이오드에서 첨가된 원자에 따라 발광 파장이 다른 것처럼 유기 발광 층에 첨가된 형광 또는 인광 색소에 따라 파장이 달라진다[15-18].

OLED에서 전계발광 메커니즘은 기본적으로 photoluminescence에서 polaron의 재결합과 유사하다. 그림 5는 OLED의 전계발광 메커니즘을 도식적으로 나타낸 것이다[18]. 양 전극에서 전자와 정공이 주입되면 무기물 반도체와 유사하게 전자는 lowest unoccupied molecular orbital(LUMO)로, 정공은 highest occupied molecular orbital(HOMO)로 주입된다. 유기물 내에 전자가 주입되면 격자 진동에 의해 에너지적으로 전자-광자 결합(electron-phonon coupling)에 의해 음성 polaron과 양성 polaron이라는 새로운 운반자로 안정된 상태를 유지한다. 안정된 두 polaron은 전기장에 의해 hopping하여 반대쪽 전극을 향해 이동하게 된다. 이렇게 이동한 polaron은 발광 층에서 재결합하여 단일(singlet) polaron 여기자(exciton)와 삼중(triplet) polaron 여기자를 형성한다. polaron 여기자 중에서 단일 polaron 여기자가 소멸하면서 polaron 여기자의 에너지에 해당하는 파장의 빛을 내게 된다. 나머지 삼중 polaron 여기자는 열과 같은 비발광 형태로 에너지가 변환되면서 소멸한다[19].

일반적으로 OLED에서 빛은 단일 여기자의 재결합에 의해서 생성되므로 저분자를 사용하는 소자에서 통계적인 내부 양자 효율(internal quantum efficiency)에 의해 25%로 제한된다. 고분자를 사용하는 소자에서는 향상된 양자 효율이 보고되었으며[20], 1998년에 Baldo 등[21]은 중금속 원자 주변에서 삼중 여기자의 재결합

에 의해 빛을 내는 인광 OLED를 제안했다.

초기 OLED에서 적용되었던 수동행렬 구동방식은 최근에 능동행렬 구동방식을 채택한 OLED로 급속하게 전환되고 있다[22]. 고품질 AMOLED에 요구되는 사항은 발광효율의 개선, 천연색 재현성의 향상, 소자의 안정성 확보와 함께 디스플레이로 실용성 제고를 위해 소자의 수명 연장이 절실한 상태이다. 소자의 수명과 화질에 중대한 영향을 주는 수분과 산소로부터 유기 소자를 격리시키려는 연구[23]가 활발하게 진행되고 있으며 OLED가 대면적화되면서 야기되는 불균일한 발광특성 개선을 위한 회로 구현에 대한 연구도 진행되고 있다[24].

2.3 전유기 디스플레이 (AOD)

전유기 디스플레이는 디스플레이를 구성하는 회로, 구동소자, 발광체를 포함한 모든 소자가 유기물로 이루어진 것을 말한다. 이러한 AOD는 기존의 디스플레이보다 가볍고, 접거나 구부릴 수 있으며 소비 전력도 매우 낮고 제작공정이 간단해서 경제적인 디스플레이 기술로 평가되고 있으며 이와 관련된 기술은 전세계적으로 초기 단계에 있다. 이러한 기술이 상용화되면 두루마리 형태나 입고 다닐 수 있는 디스플레이가 나올 것이다. AOD 관련기술이 상용화되기 위해서는 유기 반도체(organic semiconductor)에 대한 연구가 선행되어야 한다. OLED와 같이 자체 발광 특성을 갖는 유기 디스플레이를 구동하기 위해서는 TFT 소자가 필요하기 때문에 유기 반도체로 이루어진 유기 TFT(organic TFT : OTFT)에 대한 연구가 필수적이다.

유기 반도체 TFT에 대한 본격적인 연구는 1980년대 중반부터 활발하게 이루어졌다. 1986년에 Tsumura 등[25]은 polythiophene을 사용하여 점멸비(on/off ratio)를 $10^2 \sim 10^3$ 로 향상시켰으며, Burroughes 등[26]은 polyacetylene을 사용하여 10^3 의 점멸비와 $10^{-4} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 의 전하 이동도를 얻을 수 있었다. Garnier 등[27]은 poly(parabanic acid) resin(PPA) 플라스틱 기판에 α -sixithiophene을 이용하여 TFT를 제작하였다. Brown 등[28]에 의해 pentacene 박막을 형성한 후에 pentacene을 이용한 OTFT의 연구는 비약적으로 발전했다[29-32].

반도체의 특성을 갖는 유기물은 거의 탄소와 탄소 사이의 이중 결합과 단일 결합이 교대로 반복되는 구조를 갖고 있다. 탄소와 탄소 사이의 결합 길이가 교대로 반복되면 포텐셜이 주기적으로 변해 전자의 에너지는 페르미 에너지 근처에서 불연속적인 band gap을 나타내게 되어 반도체 성질을 보이게 된다. 탄소와 탄소 사이의 결합 길이나 기능성 측쇄 분자들에 의해 전기적 특성이 달라지므로 유기합성을 통해 원하는 성질의 반도체 유기물을 합성할 수 있다는 장점이 있다.

OTFT의 기본 구조는 그림 6에 나타내었다. 유기 트랜지스터의 구조는 일반적인 역 적층 게이트(inverted staggered gate) 구조의 비정질 실리콘 TFT(amorphous-silicon TFT : a-Si TFT)와 유사한 구조를 갖고 있으나 a-Si 대신에 pentacene을 사용한다. 그림에서 poly vinyl alcohol(PVA)는 식각 과정에 사용되는 용매와 현상제로부터

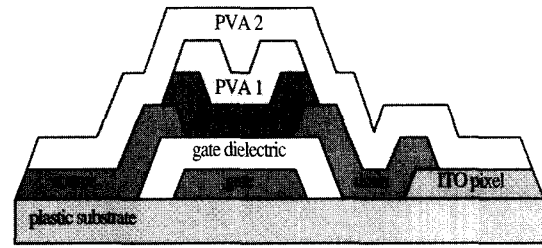


그림 6. OTFT 기본 구조의 단면도.

pentacene을 보호하기 위해 형성되었다. 또한 LCD에 적용할 경우 일반적인 액정 물질에 의해 pentacene OTFT의 성능이 현저히 저하되므로 PVA는 매우 중요한 역할을 한다. OTFT의 동작원리는 Si 기반의 반도체와 차이가 없다.

유기 반도체의 전기적 특성을 개선하려는 물질 연구와 함께 활발하게 연구되고 있는 분야는 전하 이동에 결정적인 영향을 미치는 유기물의 결정화에 대한 연구이다. Pentacene을 이용한 유기 반도체는 a-Si를 이용한 소자에 능가하는 특성을 보이고 있으나 최근 다결정 실리콘(poly crystalline silicon), 단결정 실리콘(single crystal-like silicon), 그리고 단결정 실리콘(single crystal silicon)을 이용한 소자 개발이 가속되면서 유기 반도체에서도 전하 이동도 향상을 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 유기 반도체에서 전하 이동도에 미치는 많은 요소 중에서 결정화와 직접적으로 관련된 것은 결함(defect)과 grain 경계에서의 산란이다. 결함은 증착 과정에 증착 온도와 속도에 의해 영향을 받고 단일 grain의 크기가 커지면 source와 drain에서 나온 전하가 만나게 되는 grain 경계 수가 줄어들어 전하 이동도가 커진다. 결정화를 유도하기 위해 LCD의 배향막을 이용하는 방법, 기판 온도를 높이는 방법, 유전체 표면을 처리하는 방법 등이 연구되고 있다.

3. 액정 디스플레이 기술의 발전과 동향

현재까지 전체 LCD 시장에서 노트북 컴퓨터가 차지하는 비중은 30%에 육박하여 가장 큰 시장을 형성하고 있었으나 향후 2007년에 이르러서는 CRT를 제치고 컴퓨터 모니터 시장을 선도하여 LCD 시장 규모의 40%에 이를 것으로 예상된다[1]. LCD의 화면 크기가 증가하고 HDTV 분야로 시장이 확대됨에 따라 패널의 시야각 특성과 응답속도를 개선하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이와 함께 저 소비전력 LCD에 대한 관심이 고조됨에 따라 반사형 LCD와 반투과(transflective) LCD[33]에 대한 연구도 활발하게 이루어지고 있다. 특히, 반투과 LCD는 어두운 곳에서는 광원을 이용하여 투과형으로 활용하고 밝은 곳에서는 반사형으로 이용하여 실내외에서 우수한 화질을 구현할 수 있다.

기존의 a-Si TFT에 비해 전하 이동도가 우수하고 전력 소모를 줄일 수 있으며 기판에 구동회로를 직접 설계할 수 있는 저온 다결정 실리콘(low temperature poly crystalline silicon : LTPS) TFT[34]

에 대한 연구가 활발하게 전개되고 있다. LTPS TFT에 대한 연구는, 현재 주로 사용되는 유리 기판을 플라스틱 기판으로 대체하려는 연구와 밀접한 관계가 있다. 플라스틱 기판을 사용하게 되면 패널의 무게가 가벼워지고 휨 수 있는 용도에 적용할 수 있지만 TFT의 공정 온도를 낮추어야 하기 때문에 저온에서 실리콘 결정화가 이루어져야 한다.

본 장에서는 현재 활발한 연구가 진행 중인 광시야각화 기술과 고속응답화 기술에 대해 좀 더 자세히 논의할 것이다.

3.1 광시야각화 기술 동향

LCD는 액정 분자의 광학적 비등방성과 편광자를 이용하여 정보를 표시하기 때문에 화면을 보는 방향에 따라 유효 광 경로(optical path)의 차이 때문에 광 투과도가 다르게 나타나는데 이를 시야각(viewing angle) 특성이라고 한다. 컴퓨터 모니터나 TV와 같이 화면 크기가 커지면 더 넓은 시야각 특성이 요구되고 이에 따라 LCD 패널의 시야각 특성을 개선하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. LCD 패널의 시야각을 확대하려는 노력은 크게 기존 패널의 외부에 시야각 보상층을 추가하는 방법과 새로운 액정모드를 제안하는 방법으로 나눌 수 있으며, 최근에는 두 가지 방법을 병용하고 있다. 액정모드는 다시 새로운 액정 배향 방법을 제안하는 것과 새로운 전극구조를 도입하는 것으로 나눌 수 있다.

외부에 광 보상층을 추가하는 방법은 기존의 LCD 패널에 단축성(uniaxial) 필름[35], 복합 배향 고분자(hybrid aligned polymer) 필름[36], 음의 복굴절 이축성(negative birefringence biaxial) 필름[37], 광배향 플라스틱 필름[38] 등과 같은 광 보상 필름을 사용하는 방법으로 공정이 단순하지만 시야각 개선에 한계가 있고 원가부담이 커지는 단점이 있다.

LCD의 시야각을 개선하기 위해 새로이 제안된 액정 배향 방법은 수평 배향제의 배향 방향을 러빙(rubbing)이나 UV광을 이용하여 다중 도메인(multidomain)을 얻는 방법[39,40], 수직 배향제를 이용하여 음의 유전 이방성을 갖는 액정을 이용하는 수직배향(vertical alignment : VA) 모드[41]와 역 비틀린 네마틱(inverse TN : ITN) 모드[42], 수평 배향막의 경사각을 크게하여 π -cell 구조로 제작된 광 보상 휨(optically compensated bend : OCB) 구조[43], 기판에 유전 격자(dielectric grating) 또는 surface relief grating(SRG)를 형성하여 전기장의 공간적 왜곡을 이용하는 방법[44,45] 등이 제안되었다.

히타치가 제안한 In-plane switching(IPS) 모드[46]는 전극 구조를 변형하여, 상하 기판의 전극을 형성하는 것이 아니라 한쪽 기판에 두 전극을 형성하는 방법으로서 전기장을 수평으로 인가하여 넓은 시야각을 얻을 수 있었다. IPS 모드는 개구율(aperture ratio)이 저하되어 패널의 휘도가 낮아지는 단점이 있었다. 이를 개선하기 위해 전극의 간격을 줄여서 fringe field를 이용하는 fringe field switching(FFS) 모드[47]가 제안 되었다. 새로운 전극 구조와 액정의 배향 방법을 적용한 patterned vertical alignment(PVA) 모드[48]는

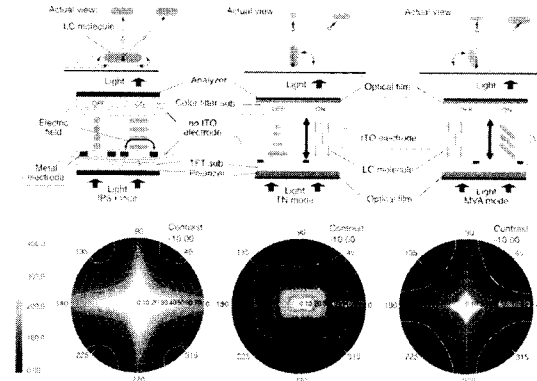


그림 7. IPS, TN, MVA 모드(그림의 왼쪽부터)의 동작 원리와 대비비[49].

수직 배향막을 이용하여 액정 분자를 수직으로 배향시키고 상하 전극의 위치를 어긋나게 하여 전기장의 공간적 왜곡을 유도하는 방법이다. 그림 7은 기존의 TN 모드와 광시야각화 기술인 IPS와 multidomain VA(MVA) 모드에 대한 동작원리와 대비비를 나타낸 것이다[49].

OCB 모드는 패널의 가운데를 중심으로 상하 방향으로 액정의 휨 배열을 이루고 있어서 상대적으로 넓은 시야각 특성을 얻을 수 있으며 구동에 의한 액정 방향자의 회전이 작아서 빠른 응답속도를 얻을 수 있으나 on/off 상태 사이의 위상차가 작아서 광 보상 편이 필요하다. 일반적으로 OCB 모드, VA 모드, PVA 모드 등은 넓은 시야각과 함께 기존의 TN 모드보다 빠른 응답속도를 보이는 액정 모드로 활발한 연구가 수행되고 있다.

3.2 고속응답화 기술 동향

멀티미디어에 대한 수요가 확대되고 HDTV와 같이 동영상 구현이 필수적인 디스플레이 시장에 LCD가 진출함에 따라 LCD의 응답속도를 향상시키려는 연구가 꾸준히 이루어지고 있다. 액정의 스위칭은 전기장에 의해 액정분자의 집합적 회전에 의해 나타나는 현상이므로 액정 물질의 전기적 특성을 개선하는 연구가 선행되어야 한다. 네마틱 액정의 응답속도를 향상시키기 위해서는 액정의 회전 점성도(rotational viscosity)를 줄이고 유전 이방성과 유효탄성계수(effective elastic constant)를 크게 하면 된다. 하지만 유효탄성계수를 크게 하면 문턱전압이 증가하게 되어 구동전압이 상승하는 문제가 발생한다. 또한 응답속도는 시편 두께의 제곱에 반비례하기 때문에 시편을 얇게 만들면 더 빠른 응답속도를 얻을 수 있으나 LCD의 수율이 떨어져 생산성이 감소하고 액정 층에 의한 위상차가 감소하여 대비비가 떨어지게 된다.

액정 물질의 전기적 특성을 향상시키려는 노력과 함께 새로운 액정 모드를 도입함으로써 응답속도를 향상시키려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 새로운 액정모드에 대한 연구는 크게 OCB

모드와 같은 네마틱 액정을 이용하는 방법, 자발 분극이 있는 강유전성 액정(ferroelectric liquid crystal : FLC)[6,50,51]이나 반강유전성 액정(antiferroelectric liquid crystal : AFLC)[52-54]을 이용하는 방법, 비카이랄 스멕틱 C 액정(nonchiral smectic C liquid crystal : NSCLC)을 이용하는 방법[55] 등이 제안되었다.

네마틱 액정은 근본적으로 응답속도에 한계가 있어 자발분극이 있는 액정을 이용하려는 연구가 활발히 이루지고 있다. 꼬임 구조(helical structure)를 이루는 카이랄 스멕틱 C(chiral smectic C : Sm^*C) LC는 거울 대칭성이 깨져 자발분극(spontaneous polarization)을 갖게 되어 강유전성 액정[56]이라고 한다. 이웃하는 스멕틱 층의 평균적 자발분극이 반대인 이중 나선 구조를 가진 Sm^*C^* 액정 상[52]을 반강유전성 액정이라고 한다. (A)FLC는 전기장과 유전 이방성의 상호작용에 의해 액정의 방향자가 회전하는 것과는 달리 전기장과 자발분극의 상호작용에 의해 스멕틱 cone 위에서 회전하게 된다. 전기장과 자발분극의 상호작용력은 일반적으로 유전 이방성과의 상호작용력보다 커서 응답속도가 빠르고 극성 상호작용력에 의해 전기장의 인가 방향에 따라 액정 방향자의 위치도 다르게 된다.

시편의 두께가 FLC의 피치(pitch)보다 충분히 작게 되면 기판 표면의 배향력에 의해 표면 안정화(surface stabilized :SS) FLC 구조[6]를 이루어 안정된 두 상태를 갖게 된다. 전기장을 인가하여 안정된 상태에 도달한 액정 분자는 전기장을 제거해도 안정된 상태를 유지하다가 반대 극성의 전기장이 인가되면 나머지 다른 안정된 상태로 전이하는 메모리 효과가 나타난다. SSFLC는 두개의 안정된 상태만 존재하므로 계조표시를 할 수 없어 공간 분할법이나 시분할 방법을 적용하여 계조 표시를 해야 함으로 계조의 수를 증가시키거나 회소의 수를 증가 시키면 전체적으로 응답속도가 저하된다. FLC의 피치가 시편의 두께에 비해 충분히 짧은 경우에 FLC는 꼬임변형(deformed helix : DH)에 의해 연속적인 계조표시가 가능하다[50]. 일반적으로 삼안정성(tristable)을 갖는 반강유전성 액정에서 메모리 효과가 최소화되면 연속적인 계조 표시가 가능한 V형(V-shaped) 반강유전성 액정 모드[53]를 얻을 수 있다. 하지만 이상의 (A)FLC를 사용하는 액정 모드는 배향막과 액정의 미묘한 상호작용에 의해 대면적의 균일한 배향을 얻을 수 없다[57,58].

최근에 균일한 배향을 얻기 위해 피치가 가시광선의 파장보다 짧은 강유전성 액정을 수직 배향하는 수직구조 꼬임변형 강유전성 액정(vertical configuration DHFLC : VC-DHFLC) 모드[51]를 수평전극에서 구동하여 빠른 응답속도와 함께 넓은 시야각을 얻을 수 있었다. 그림 8은 VC-DHFLC 모드의 동작원리를 나타내는 것으로 전기장이 인가되지 않으면 수직 배향된 FLC의 짧은 피치 때문에 가시광선 영역에서 등방성을 나타내어 완전히 어두운 상태를 얻을 수 있다. 전기장이 인가되면 전기장의 방향으로 정렬하고 전기장의 극성에 의해 하나의 전극을 중심으로 FLC의 방향자가 반대칭을 이루어 시야각을 보상하게 된다. 피치가 가시광선의 파장보다 긴 FLC나 AFLC에 카이랄 첨가제(chiral dopant)를 첨가하

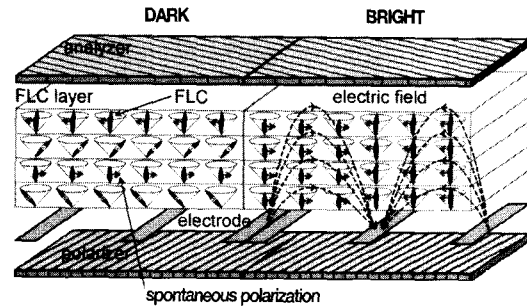


그림 8. VC-DHFLC 모드의 동작원리[51].

여 피치를 짧게 만들어도 이와 같은 특성을 얻을 수 있다[54].

마지막으로 FLC와 같이 기울어진 스멕틱 층을 가지고 있지만 카이랄리티(chirality)가 없어서 피치와 자발분극이 없는 NSCLC는 FLC보다 균일한 배향을 얻기 쉽고 스멕틱 층사이의 상호작용이 작아서 응답속도가 네마틱 액정을 이용하는 것보다 빠르다. 또한 네마틱에서 처럼 유전 이방성에 구동되므로 기존의 TN 모드 구동회로와 IC를 사용할 수 있는 장점이 있다[55]. 그림 9는 NSCLC의 동작원리를 나타내는 것으로 수평전극에 전기장이 인가되면 전기장의 힘에 의해 두 전극 사이에 상보적인 두 영역이 형성되어 시야각 특성이 개선된다.

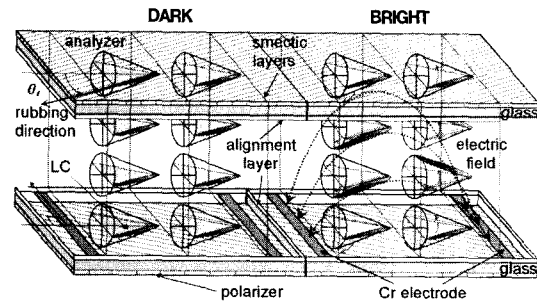


그림 9 NSC LC 모드의 동작원리[55].

그리고 새로운 액정 모드에 대한 연구와 함께 새로운 구동방법을 도입하여 응답속도를 향상시키려는 노력이 활발히 이루어지고 있다. 일반적으로 계조 사이의 응답속도가 현저하게 느리므로 이를 해결하기 위한 노력의 일환으로 bias 전압 효과[59]와 transient 네마틱 효과[60] 등이 연구되고 있다. 문턱 전압 이상으로 bias 전압을 인가하면 실제 액정 구동 전압이 인가되었을 때 빠르게 반응을 보일 수 있으나 bias 전압이 문턱 전압과 비슷하게 되면 응답시간이 현저하게 느리지는 문제가 있다. Transient 네마틱 효과를 이용하는 고속응답 구동방법으로는 capacitively coupled driving(CCD) 구동방법 [61]과 dynamic capacitance compensation(DCC) 구동방법[62] 등이 있다. CCD 구동방법은 실제 인가되는 전압에 투과도 보상을 위한 보상전압을 더하여 인가

하는 방법이고 DCC 구동방법은 펄스 폭이 좁고 원하는 전압보다 높은 전압을 인가하여 액정 방향자의 회전이 높은 전압에 대해 완료되기 전에 원하는 투과도 상태에서 안정된 전압으로 변경하여 빠른 응답속도를 얻는 방법이다.

4. 결론

“사람과 기계간의 인터페이스”의 역할을 담당하고 있는 디스플레이는 멀티미디어 시대와 고도 정보화 시대를 함께 열어가는 “고품질 정보 서비스의 창”으로써의 역할이 중요해졌다. 인간의 활동 영역의 확대와 함께 휴대 가능한 정보통신 시장의 급속한 팽창과 시장의 다양한 요구는 평판 디스플레이가 풀어야 할 과제로 대두되고 있다. 저 소비전력 디스플레이에 대한 수요에 따라 반사형 또는 반투과 LCD와 LTPS에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며 대면적 LCD의 시야각과 응답속도를 개선하기 위한 노력이 경주되고 있다. 차세대 디스플레이로 그 응용 범위가 무궁무진한 전유기 디스플레이를 위한 OLED에 대한 연구와 OTFT에 대한 연구는 최근에 괄목할 만한 성과를 거두고 있다. 우수한 특성을 지닌 물질과 공정 기술의 개발은 유기 평판 디스플레이를 포함한 디스플레이 분야의 눈부신 성과를 이루게 하는 견인차로써 지속적인 연구 개발이 요구된다. 영화 “마이너리티 리포트”[63]에서 보여진 미래의 디스플레이가 더 이상 상상의 세계에서만 이루어지는 일은 아닐 것이다.

참고 문헌

[1] D. E. Mentley, “Display Market and Technology Trends”, SID '02 (19 May ~ 24 May, 2002, Boston), Seminar Lecture Notes, Seminar M-1.
 [2] SID '02 (19 May ~ 24 May, 2002, Boston), Evening Panel “OLED vs AMLCD”.
 [3] G. H. Heilmeyer, L. A. Zanoni, and L. A. Barton, “Dynamic scattering in nematic liquid crystals”, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 13, p. 46, 1968.
 [4] G. H. Heilmeyer and L. A. Zanoni, “Guest-host interaction in nematic liquid crystals: A new electro-optic effect”, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 13, p. 91, 1968.
 [5] M. Shadt and W. Helfrich, “Voltage-dependent optical activity of a twisted nematic liquid crystal”, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 18, p. 127, 1971.
 [6] N. A. Clark and S. T. Lagerwall, “Submicrosecond bistable electro-optic switching in liquid crystals”, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 36, p. 899, 1980.
 [7] T. J. Scheffer and J. Nehring, “A new highly multiplexable liquid crystal display”, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 45, p. 1021,

1984.
 [8] T. P. Brody, J. A. Asars, and G. D. Dixon, “A 6” x 6” 20 lines per inch liquid crystal display panel”, *IEEE Trans. El. Devices* ED20, p. 993, 1973.
 [9] W. C. O' Mara, “Liquid Crystal Flat Panel Display”, (Van Nostrand Reinhold, New York, 1993), Chapter 2.
 [10] V. Fredericksz and V. Zolina, “Forces causing the orientation of an anisotropic liquid crystal”, *Trans. Faraday Soc.*, Vol. 29, p. 919, 1933.
 [11] C. W. Tang and S. V. VanSlyke, “Organic electroluminescent diodes”, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 51, p. 913, 1987.
 [12] G. Gustafsson, Y. Cao, G. M. Treacy, F. Klavetter, N. Colaneri, and A. J. Heeger, “Flexible light-emitting diodes made from soluble conducting polymers”, *Nature (London)*, Vol. 357, p. 477, 1992.
 [13] G. Gu, V. Bulovic, P. E. Burrows, S. R. Forrest, and M. E. Thompson, “Transparent organic light emitting devices”, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 68, p. 2606, 1996.
 [14] J. H. Burroughes, D. D. C. Bradley, A. R. Brown, R. N. Marks, K. MaKay, R. H. Friend, P. L. Burn, and A. B. Holmes, “Light-emitting diodes based on conjugated polymers”, *Nature (London)*, Vol. 347, p. 539, 1990.
 [15] C. W. Tang, S. A. VanSlyke, and C. H. Chen, “Electroluminescence of doped organic thin films”, *J. Appl. Phys.*, Vol. 65, p. 3610, 1989.
 [16] D. F. O'Brien, M. A. Baldo, M. E. Thompson, and S. R. Forrest, “Improved energy transfer in electrophosphorescent devices”, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 74, p. 442, 1999.
 [17] M. A. Baldo, S. Lamansky, P. E. Burrows, M. E. Thompson, and S. R. Forrest, “Very high-efficiency green organic light-emitting devices based on electrophosphorescence”, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 75, p. 4, 1999.
 [18] 김상수, 김용배, 김현재, 이신두, 이종덕, 임성규, 장진, 정태영, “디스플레이 공학 I”, (청범출판사, 서울, 2000), 제 3편.
 [19] N. F. Colaneri, D. D. C. Bradley, R. H. Friend, P. L. Burn, A. B. Holmes, and C. W. Spangler, “Photoexcited states in poly(p-phenylene vinylene): Comparison with trans,trans-distyrylbenzene, a model oligomer”, *Phys. Rev.*, Vol. B42, p. 11670, 1990.
 [20] B. Kraabel, Jan C. Hummelen, D. Vacar, D. Moses, N. S. Sariciftci, A. J. Heeger, and F. Wudl, “Subpicosecond photoinduced electron transfer from conjugated polymers to functionalized fullerenes”, *J. Chem. Phys.*, Vol. 104, p. 4267, 1996.

- [21] M. A. Baldo, D. F. O' Brien, Y. You, A. Shoustikov, S. Sibley, M. E. Thompson, and S. R. Forrest, "Highly efficient phosphorescent emission from organic electroluminescent devices", *Nature (London)*, Vol. 395, p. 151, 1998.
- [22] Bruce Lu, "Glow of OLEDs lures scientists into feverish technology quest", *Display Devices*, p. 34, Spring 2002.
- [23] J. C. Carter, I. Grizzi, S. K. Heeks, D. J. Lacey, S. G. Latham, P. G. May, O. Ruiz de los Panos, K. Pichler, C. R. Towns, and H. F. Wittmann, "Operating stability of light-emitting polymer diodes based on poly(p-phenylene vinylene)", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 71, p. 34, 1997.
- [24] Yi He, Reiji Hattori, and Jerzy Kanicki, "Four-thin film transistor pixel electrode circuits for active-matrix organic light-emitting displays", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 41, p. 1199, 2001와 해당 논문의 참고문헌.
- [25] A. Tsumura, H. Koezuka, and T. Ando, "Macromolecular electronic device: Field-effect transistor with a polythiophene thin film", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 49, p. 1210, 1986.
- [26] J. H. Burroughes, C. A. Jones, and R. H. Friend, "New semiconductor device physics in polymer diodes and transistors", *Nature (London)*, Vol. 335, p. 137, 1988.
- [27] F. Garnier, G. Horowitz, X. Peng, and D. Fichou, "An all-organic 'soft' thin film transistor with very high carrier mobility", *Adv. Mater.*, Vol. 2, p. 592, 1990.
- [28] A. R. Brown, A. Pomp, D. M. de Leeuw, D. B. M. Klaassen, E. E. Havinga, P. Herwig, and K. Mulen, "Precursor route pentacene metal-insulator-semiconductor field-effect transistors", *J. Appl. Phys.*, Vol. 79, p. 2136, 1995.
- [29] D. J. Gundlach, Y.-Y. Lin, T. N. Jackson, S. F. Nelson, and D. G. Schlom, "Pentacene organic thin-film transistors-molecular ordering and mobility", *IEEE Electron Device Lett.*, Vol. 18, p. 87, 1997.
- [30] Y.-Y. Lin, D. J. Gundlach, S. F. Nelson, and T. N. Jackson, "Pentacene-based organic thin-film transistors", *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 44, p. 1325, 1997.
- [31] T. N. Jackson, Y.-Y. Lin, D. J. Gundlach, and H. Klauk, "Organic thin-film transistors for organic light-emitting flat-panel display backplanes", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 4, p. 100, 1998.
- [32] H. Klauk, D. J. Gundlach, J. A. Nichols, and T. N. Jackson, "Pentacene organic thin-film transistors for circuit and display applications", *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 46, p. 1258, 1999.
- [33] M. Kubo, T. Ochi, Y. Narutaki, T. Shinomiya, and Y. Ishii, "Development of Advanced TFT-LCD with good legibility under any ambient light intensity", *J. Soc. Inform. Disp.*, Vol. 8, p. 299, 2000.
- [34] J. Ohwada, H. Kawakami, Y. Nagae, Y. A. Ono, K. Ono K., A. Mimura, and N. Konishi, "Driving condition for low-temperature poly-Si TFT LCD", 1987 SID Int' l Sym. Digest of Technical Papers, p. 55, 1987.
- [35] J. Chen, K.-H. Kim, J.-J. Jyu, J. H. Souk, J. R. Kelly, and P. J. Bos, "Optimum film compensation modes for TN and VA LCDs", 1998 SID Int' l Sym. Digest of Technical Papers, p. 315, 1998.
- [36] T. Uesaka, T. Toyooka, and Y. Kobori, "Wide-viewing-angle reflective TN-LCD with single polarizer and hybrid aligned nematic compensation films", 1999 SID Int' l Sym. Digest of Technical Papers, p. 94, 1999.
- [37] S.-T. Wu and C.-S. Wu, "A Biaxial Film-Compensated Thin Homogenous cell for Reflective Displays", 1998 SID Int' l Sym. Digest of Technical Papers, Vol. 770, 1998.
- [38] J. Chen, K. C. Chang, J. DelPico, H. Seiberle, and M. Schadt, "Wide viewing angle photoaligned plastic films for TN-LCDs", 1999 SID Int' l Sym. Digest of Technical Papers, p. 98, 1999.
- [39] S. Kaneko, Y. Hirai, and K. Sumiyoshi, "Wide-Viewing-Angle Improvements for AMLCDs", 1993 SID Int' l Sym. Digest of Technical Papers, p. 265, 1993.
- [40] M. Schadt, H. Seiberle, and A. Schuster, "Optical patterning of multidomain liquid-crystal displays with wide viewing angles", *Nature (London)*, Vol. 381, p. 212, 1996.
- [41] S. H. Lee, J. G. You, H. J. Park, B. G. Rho, J. H. Lee, S. K. Kwon, and H. S. Park, "High-Contrast Homeotropic LCDs Utilizing Negative-Birefringent Compensation Film", 1997 SID Int' l Sym. Digest of Technical Papers, p. 675, 1997.
- [42] J. S. Patel and G. B. Cohen, "Inverse twisted nematic liquid-crystal device", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 68, p. 3564, 1996.
- [43] T. Miyashita and T. Uchida, "Optically compensated bend mode (OCB mode) with wide viewing angle and fast response", *IEICE Trans. Electron.*, Vol. E79, p. 1076, 1996.
- [44] T.-Y. Yoon, J.-H. Park, J. Sim, and S.-D. Lee, "Self-formation of microdomains by the topographical and fringe field effects in a liquid crystal display with dielectric surface gratings", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 81, p. 2361, 2002.
- [45] J.-H. Park, J.-H. Lee, D.-H. You, and S.-D. Lee, "Axially symmetric vertically-aligned (ASVA) liquid crystal display using surface relief gratings on a polymer layer", *Mol. Cryst. & Liq. Cryst.*, Vol. 371, p. 231, 2001.
- [46] M. Oh-e and K. Kondo, "Electro-optical characteristics and

- switching behavior of the in-plane switching mode", Appl. Phys. Lett., p.3895, 1995.
- [47] S. H. Lee, S. L. Lee, and H. Y. Kim, "Electro-optic characteristics and switching principle of a nematic liquid crystal cell controlled by fringe-field switching", Appl. Phys. Lett., Vol. 73, p. 2881, 1998.
- [48] K. H. Kim, K. H. Lee, S. B. Park, J. K. Song, S. N. Kim, and J. H. Souk, "Domain divided vertical alignment with optimized fringe field effect", Proc. Asia Display '98, p. 383, 1998.
- [49] Z. Tajima and E. Syusuke, "Super-IPS Addresses Flaws of IPS, Widen Viewing Angles in LCD", Display Devices, p. 16, Spring 2000.
- [50] B. I. Ostrovskii and V. G. Chigrinov, "Linear electrooptic effect in chiral smectic C liquid crystals", Sov. Phys. Crystallor., Vol. 25, p. 322, 1980.
- [51] J.-H. Lee, C.-J. Yu, D.-H. You, and S.-D. Lee, "Wide-viewing display configuration of helix-deformed ferroelectric liquid crystals", 6th Int' l Display Workshops, p. 129, 1999.
- [52] A. D. L. Chandani, Y. Ouchi, H. Takezoe, and A. Fukuda, "Novel phases exhibiting tristable switching" Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 28, p. L1261, 1989.
- [53] S. Inui, N. Jimura, T. Suzuki, H. Iwane, K. Miyachi, Y. Takenishi, and A. Fukuda, J. Mater. Chem., Vol. 6, p. 71, 1996.
- [54] D.-H. You, J.-H. Lee, T.-Y. Yoon, and S.-D. Lee, "The vertical configuration of antiferroelectric liquid crystal display mode", 6th Proc. Asian Sym. Inform. Disp., p. 186, 2000.
- [55] C.-J. Yu, J.-Y. Kim, and S.-D. Lee, "Fast analog electro-optic effect in an achiral smectic C liquid crystal in a transverse electrode configuration", Appl. Phys. Lett., Vol. 80, p. 1111, 2002.
- [56] R. B. Meyer, L. Liebert, L. Strzelecki, and P. Keller, "Ferroelectric liquid crystals", J. Phys. (Paris) Lett., Vol. 36, p. L69, 1975.
- [57] N. A. Clark, T. P. Rieker, and J. E. Maclennan, "Director and layer structure of SSFLC cells", Ferroelectrics, Vol. 85, p. 467, 1988.
- [58] J. Funfschilling and M. Schadt, "New short-pitch bistable ferroelectric (SBF) liquid crystal displays", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 30, p. 741, 1991.
- [59] P. D. Berezin, L. M. Blinov, I. N. Kompanets, and V. V. Nikitin, "Electrooptic switching in oriented liquid crystal films", Sov. J. Quantum Electron., Vol. 3, p. 78, 1973.
- [60] S. T. Wu and C. S. Wu, "Small angle relaxation of highly deformed nematic liquid crystals", Appl. Phys. Lett., Vol. 53, p. 1794, 1988.
- [61] S. Nagata, E. Takeda, Y. Nan-no, T. Kawaguchi, Y. Mino, A. Otsuka, and S. Ishihara, "Capacitively coupled driving of TFT-LCD", 1989 SID Int' l Sym. Digest of Technical Papers, p. 242, 1989.
- [62] B. W. Lee, C. Park, S. Kim, M. Jeon, J. Heo, D. Sagong, J. Kim, and J. Souk, "Reducing gray-level response to one frame : dynamic capacitance compensation", 2001 SID Int' l Sym. Digest of Technical Papers, p. 1260, 2001.
- [63] S. Spielberg, "Minority Report", (20th Century Fox and Dreamworks Picture, USA, 2002).

저 자 약 령

성 명 : 이신두

❖ 학 령

- 1980년 서울대 물리학과 이학사
- 1982년 서울대 대학원 물리학과 이학석사
- 1988년 미국 Brendeis 대학 물리학과 이학박사

❖ 경 령

- 1988년-1990년 미국 Bellcore 연구원
- 1991년-1992년 미국 Optron System 수석연구원
- 1992년-1997년 서강대 조교수/부교수
- 1997년-현재 서울대 부교수/교수
- 2000년 KISTEP 정보전자 전문위원
- 2001년-현재 서울대 디스플레이 연구센터 센터장

성 명 : 유창재

❖ 학 령

- 1996년 서강대 물리학과 이학사
- 1998년 서강대 대학원 물리학과 이학석사
- 현재 서울대 대학원 전기공학부 박사과정

❖ 경 령

- 1999년-2001년 육군전산소 S/W 개발팀 군복무