

Thema | Devices on Real Paper

1. 서론

문 대규 책임연구원
(전자부품연구원 디스플레이연구센터)
한 정인 수석연구원
(전자부품연구원 디스플레이연구센터)
이 찬재 전임연구원
(전자부품연구원 디스플레이연구센터)
김 영훈 전임연구원
(전자부품연구원 디스플레이연구센터)

동물과 인간을 비교하는 가장 큰 특징 중에 하나는 인간은 문화를 향유한다는 것이다. 이를 위해 인간은 습득한 지식을 다른 인간들에게 전달하여 왔고 이러한 전달은 말과 글, 그림의 형태로 이루어져 왔다. 말의 일회성에 의하여 글과 그림형태의 기록은 매우 중요한 역할을 하게 되었다. 이러한 정보를 기록하기 위해서는 쉽게 기록하고 볼 수 있는 매체가 필요하게 되었는데 후한시대 채륜에 의하여 종이(가죽)가 만들어지기 전까지는 석판이나 파피루스, 대나무, 가죽, 천 등에 글이나 그림 등을 기록하였다. 채륜의 종이는 나무와 마껍질 등을 이용하여 제작되었으나 시대가 지남에 따라 기술이 발전하여 양질의 종이를 대량으로 생산할 수 있게 된 덕분에 종이는 정보 전달의 매체로써 가장 중심적인 역할을 담당하여 왔다.

그러나 현대사회에 들어와 TV, 컴퓨터 등이 개발되면서 정보의 전달의 매체는 종이로 이루어진 책이나 서신이 아니라 전자 기기의 형태로 변모되어 왔다. 특히 정보화 사회로의 진입에 따라 언제든지 정보를 접할 수 있는 휴대성이 강조되고 엄청난 양의 정보를 계속해서 보여줄 수 있는 형태가 요구됨으로써 다양한 전자기기 형태의 저장장치와 디스플레이가 발전되어 왔다. 특히 휴대성이 강조되면서 플렉시블한 디스플레이가 차세대 디스플레이로써 대두되고 있는데 이를 위하여 제시되고 있는 기판은 PC, PES, PEN, PET 등 고분자 재료로 이루어져 있다. 이러한 재료는 열팽창 계수가 크고 열적 안정성이 매우 낮은 단점을 가지고 있다. 또한 석유 화학 제품으로 제작 또는 폐기 시 환경오염 등이 고려되어야 하는 재료이기도 하다.

이에 비하여 종이는 열팽창이 적고 화학적으로 비교적 안정하며 플렉시블하고 가볍고 크기조절이 쉬운 저가의 재료이다. 또한 아직까지 종이는 인간에게 있어서 정보 전달매체로써 가장 사랑받고 있는 친숙한 재료이며 환경 친화적인 재료이므로 이를 이용하여 디스플레이를 제작할 경우 안정적인 디스플레이를 제작할 수 있을 것으로 기대되고 있다. 그러나 종이는 표면이 거칠고 물에 약한 단점이 있으므로 이를 극복하기 위한 여러 가지 공정이 개발되어야 한다.

종이 위에 디스플레이 소자나 반도체 회로 등을 제작하는 연구에 대해서는 아직까지 많은 연구는 진행되고 있지 않지만 종이 위의 디바이스가 현실화되면 현재 연구되고 있는 E-Book이나 광고 등에 있어서 사람들에게 더욱 친숙하고 편리한 장치를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

본 기고문에서는 전자부품연구원에서 시도한 종이를 전자디바이스용 기판으로 사용하기 위한 방법과 그 디바이스의 특징에 대하여 기술하겠다.

2. 종이의 특징

종이의 조건으로 다음의 네 가지를 든다.

첫째, 형상은 얇고 평평하다.

둘째, 원료는 하나하나 풀어 놓은 식물섬유이다.

셋째, 산산이 흩어진 섬유를 열기설기 엮어놓은 구조 곧 그물구조를 가진다.

넷째, 섬유를 물속에 분산시킨 후 체나 그물로 걸어 올려 물을 여과시켜 만든다. 이것을 “종이를 뜬다”라고 한다.

위의 네 가지 조건은 채륜이 서기 105년에 발명한 방식 그대로이다

종이는 일상생활의 모든 분야에서 사용되고 있으며 용도에 따라 특징도 달라 그 종류는 상당히 많다. 종이가 발명되었던 때의 주요목적은 기록 및 정보 전달이었으며 지금도 그 중요성은 변하지 않았으나 가벼우면서도 적당히 질긴 성질 등이 여러 용도를 낳게 된 것이다. 예를 들어 외부에서 내용물이 보이지 않도록 차단하는 데 목적을 둔 포장의 경우 작은 물건포장에서 벽지(壁紙)에 이르기까지 종류는 물론 규모도 다양하다. 또 종이의 흡수성은 셀룰로오스섬유 자체가 물에 대한 친화력이 높다는 것과 종이 다공성 구조로 이루어진 것에 기인하는데 그 성질을 살린 것이 티슈페이퍼·종이타월 등이다. 그리고 종이가 유전체(誘電體)임을 이용하여 복사용으로 사용하고 있으며, 높은 절연성(絶緣性)에 얇고 균일한 두께를 이루고 있기 때문에 절연지(絶緣紙)로도 이용하여 왔다. 이처럼 종이의 종류는 다양하여 분류기준을 상세히 규정하면 셀 수 없을 정도인데 간략히 정리해 보면 표1과 같다.

표 1. 종이의 분류.

대분류	소분류
신문용지	
인쇄용지	백상지, 충질지
도공인쇄용지	편면아트지, 양면아트지, 코트지, 광택지, 엠보스지
박엽지	권련지, 인디아지, 타이프라이터페이퍼
특수지	도화용지, 벽지원지
정보용지	노카본원지, 감광지, 복사지, 감열지, 점프터용지
위생용지	화장지, 생리용지, 타월용지
포장용지	미표백 포장용지, 표백포장용지

이러한 다양한 종류의 종이를 제작하기 위해서는 각종 표면처리과 첨가물이 필요하다. 종이에 필요한 성질을 부여하기 위해서 사이즈제, 전분, 습윤 및 건조 지력 증강제, 충전제, 표백제 등 다양한 약품이 첨가된다.

3. 전자디바이스용 종이 기판 제작

종이의 원료인 목재섬유는 대부분 가늘고 긴 섬유이므로 이를 이용해서 만든 종이는 매우 평활하고 고광택을 지닐지라도 그림1과 같이 Textile조직을 가지게 되고 이에 의하여 전자디바이스를 제작하기에는 매우 거친 표면을 가지게 된다. 또한 종이는 이러한 조직에 의한 다공성과 종이 안에 들어있는 헤미셀룰로오스 성분의 친수성에 의하여 수분을 쉽게 흡수하게 된다. 따라서 이러한 종이 위에 디바이스를 제작할 경우에는 기판이 젖게 되어 소자가 Short되거나 특성이 저하될 수 있고 공정 중 기판이 변형



그림 1. 종이의 표면 사진.

될 수 있으므로 기판을 물에 젖지 않도록 하는 것이 필요하다.

본 실험에서는 이를 위하여 Parylene (Poly(Paraxylene))을 진공 중에서 일종의 화학기상증착(CVD) 공정에 의해 코팅하였다. 이 방식은 코팅하고자 하는 소재의 형상에 관계없이 미세 Pin-Hole 및 Crack 에도 균일하게 3차원적으로 코팅되며, 현존하는 모든 유기용매에 거의 용해되지 않을 뿐만 아니라 수분 및 기체투과율이 매우 낮다. 코팅 전 과정이 건식이므로 기존 고분자 합성법에 비해 환경친화적이며 공정이 매우 단순할 뿐만 아니라, 가소제가 첨가되지 않으므로 Out-Gassing 등의 문제가 발생하지 않고 저 유전상수 및 탁월한 전기적 절연특성을 가지므로 종이를 기판으로 사용할 때 코팅재료로 적합하다. 그림2(a)는 Bare상태의 종이의 표면이며 (b)는 Parylene가 5 μm 두께로 코팅된 종이의 표면이다. 표면 거칠기는 각각 31.4 nm와 11 nm로 나타났다. 이렇게 표면 거칠기가 향상된 기판 위에 Ni를 스퍼터

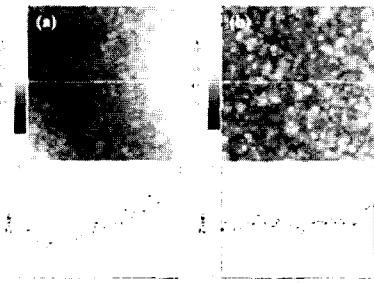


그림 2. Parylene이 코팅된 표면.

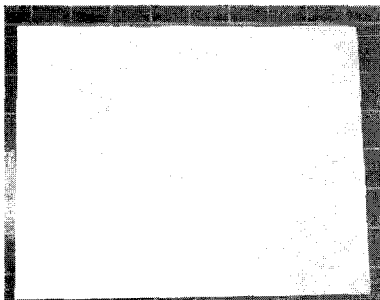


그림 3. Parylene이 코팅된 종이의 방수 특성.

링 방법으로 200 nm 두께로 형성시킬 경우 면저항은 25.7 Ω/□에서 5.5 Ω/□로 매우 낮아졌다.

그림3은 종이 위에 파릴렌 5 μm를 코팅한 후 물방울을 떨어뜨렸을 때의 이미지이다. 통상의 종이의 경우에는 물방울이 종이로 흡수되지만 Parylene이 코팅된 종이는 물이 전혀 흡수되지 않아 포토리소그라피 등의 Wet Process가 가능하였다.

4. 종이 기판위에 OTFT 제작

파릴렌이 코팅된 종이 위에 100 nm 두께의 Ni를 스퍼터링 방법에 의하여 형성시킨 후 Gate 패턴을 포토리소그라피 방법으로 형성하였다. 이후 절연층으로 Polyimide 40 nm, SiO₂ 210 nm를 형성하였다. 소스/드레인 전극으로는 Cr(20 nm)와 Au(50 nm)를 각각 Evaporation 방법으로 증착한 후 포토리소그라피와 Wet Etching으로 패턴을 형성하였다. 전극 형성 후 O₂ Plasma와 Hexamethyldisilazane 처리를 연속적으로 시행하여 표면을 개질시켰다.

Poly(3-Hexylophenylene)(P3HT)는 THF(Tetrahydrofuran)과 Acetonitrile를 사용하여 정제한 후 Chloroform에 0.2%의 농도로 녹여 Spin Coating 방법으로 코팅하였다. 이후 90 °C의 진공오븐에서 2시간 동안 건조하였다. 그림4는 종이기판 위에 제작된 OTFT의 소자의 개략도이다.

그림5는 종이기판 위에 제작된 OTFT소자의 특성 곡선이다. 사용된 TFT의 Gate Length와 Width는 각각 25 μm와 500 μm이었다. 게이트 절연막으로는

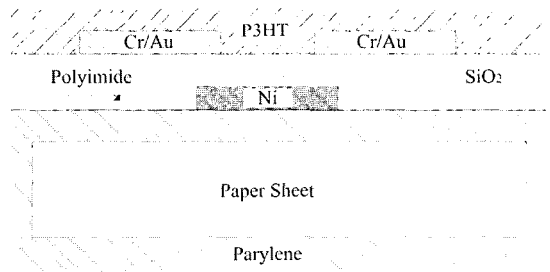


그림 4. 제작된 OTFT.

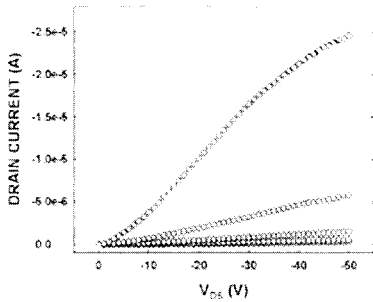


그림 5. 게이트 전압에 대한 드레인 전류곡선.

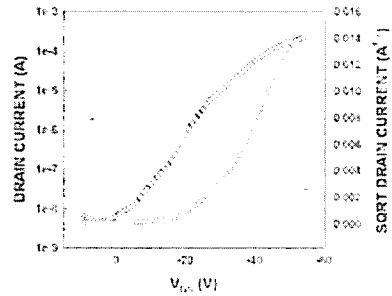


그림 6. Drain current versus gate voltage at a drain voltage of -40V.

Polyimide와 SiO_2 ($C_i=10.1 \text{ nF/cm}^2$)의 이중층을 사용하였다. 드레인 전압이 낮은 영역에서는 드레인 전류가 비선형적인 특성을 보였으며 이는 소스/드레인 전극과 P3HT사이의 Schottky Barrier에 의한 것이다. 전류곡선의 비선형성은 절연막의 두께와 소스/드레인 전극 재료를 최적화시킴으로써 개선시킬 수가 있다.

그림6은 V_{ds} 가 -40 V인 OTFT의 Transfer특성이다. 제작된 소자의 Field Effect Mobility 값은 $0.086 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 이고 Threshold Voltage는 -11.9 V였다. Accumulation모드와 Depletion모드에서의 전류 값의 비는 10^4 이상으로 나타났다. 이러한 결과로부터 종이기판 위에 제작된 P3HT채널을 가진 OTFT특성이 유리나 필름기판 위에 제작된 소자와 비교할 때 거의 동일한 수준을 가짐을 알 수 있었다.

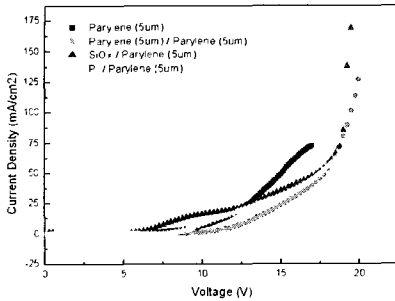
5. 종이 기판위에 OLED 소자 제작

종이 기판위에 OLED소자를 제작하기 위해서는 OLED 소자가 안정되게 형성될 수 있도록 기판의 Water Barrier를 형성하는 것이 중요하며 이를 위하여 앞에서와 같이 파릴렌을 이용하여 보호막을 형성하였다. 또한 종이는 자체 특성이 불투명하여 발광된 빛이 종이를 투과하여 나오는 것은 불가능하므로 기판의 반대방향으로 빛이 방출되는 Top Emission 구조로 소자를 제작하였다.

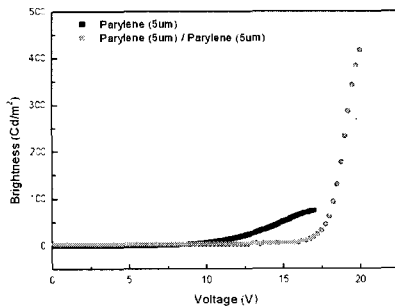
Top Emission구조를 위하여 Anode로는 Ni를 사

용하였다. Ni는 스퍼터링 방법으로 증착한 후 포토 리소그래피 방법으로 전극 구조를 형성하였다. 이후 50 w에서 5분간 산소 플라즈마 처리를 실시한 후 진공 중에서 유기물을 증착하였다. 소자는 α -NPD (4,4' [N-(1-Naphthyl)-N-Phenyl- Amino]Biphenyl) 과 Alq_3 (Tris(8- Hydroxyquinoline)Aluminum)을 50 nm와 35 nm를 각각 증착하였다. 발광효율의 향상을 위하여 C6(3-(2-Benzothiazolyl)-7- (Diethylamino)-2H-1-Benzopyran-2-One)을 1% 도핑하였다. 이 위에 10 nm의 BCP(2,9-Dimethyl-4,7Diphenyl-1,10- Phenanthroline)를 증착하였다. Cathode전극으로는 LiF 0.5 nm와 Al 10 nm를 적층하여 사용하였다. 두 물질을 사용하였을 경우 투과율은 Green영역에서 약 35%였다. 제작된 소자의 발광면적은 $2 \times 10 \text{ mm}$ 였다.

OLED는 기판의 표면 상태에 많은 영향을 받으므로 종이 위에 Parylene만 코팅한 것과 SiO_2 , PI를 코팅한 기판을 제작하여 그 위에 상기 기술한 공정으로 소자를 제작하여 그 특성을 평가하였다. 파릴렌만 단독으로 증착된 기판위에 제작된 소자가 다른 소자들에 비하여 큰 전류증가율을 보였으나 전류밀도의 최대치는 상대적으로 낮게 나타났다. SiO_2 층이 추가로 증착된 기판위에 제작된 소자는 17.5 V에서 175 mA/cm^2 의 최대 전류밀도를 보였으며 가장 낮은 Turn-On전압을 나타냈으나 전압에 따른 전류밀도의 증가는 불균일하게 나타났다. Parylene을 5 μm 씩 두 번 증착한 기판위에 제작된 소자는 전류밀도 증가와 휘도 부분에서 타 소자에 비하여 우수한 것으

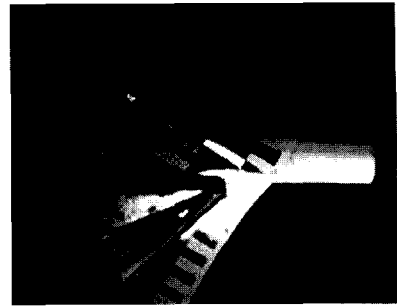


(a)

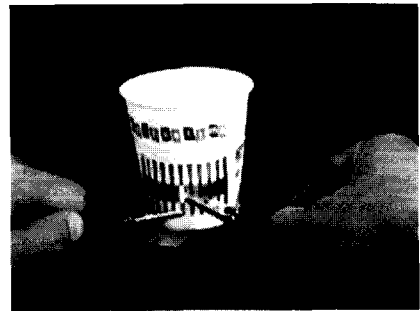


(b)

그림 7. 종이 기판 위에 제작된 OLED 소자의 특성 곡선(a)전압대비 전류밀도(b)전압대비 휘도.



(a)



(b)

그림 8. 종이 기판에 제작된 OLED 소자.

로 나타났으나 Turn-On Voltage와 Threshold Voltage간의 차이가 다소 크게 나타났다. 제작된 소자의 최대 휘도는 425 cd/cm^2 이었다.

그림8(a)은 종이기판위에 제작한 소자는 지름 8 mm의 펜에 말아서 구동시킨 사진이다. 이 OLED소자는 15 V에서 약 50 cd/m^2 의 밝기를 보였다. 종이 기판은 다양한 용도로 활용하는 것이 가능할 것으로 예상된다. 그림8(b)은 일반적으로 많이 사용하는 종이컵 위에 OLED소자를 제작한 사진이다. 소자의 구조는 상기 기술한 것과 동일하게 하여 제작하였으며 이 경우에도 잘 동작하는 것을 확인할 수 있었으며 이를 이용하면 광고 등 새로운 분야에서의 활용이 가능할 것으로 전망된다.

6. 결론

종이는 인류에게 가장 친숙한 재료 중 하나이며

인류 문명 발전에 있어서 가장 중요한 매체였다. 이러한 종이는 정보화 사회로 전환되며 각종 전자기기가 급격히 발전하여 그 위상이 다소 낮아지고 있으나 종이 고유의 특성을 잘 살린다면 전자 소자의 기판이라는 새로운 용도로써 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 종이를 기판으로 하고 Parylene 등을 Water Barrier로 활용함으로써 포토리소그라피 등의 공정이 가능하고 이를 이용하여 OTFT, OLED 등의 소자를 제작함으로써 정보화 시대에 적합한 새로운 개념의 정보 전달 매체가 탄생시킬 수 있을 것이다.

저자약력



성명: 문 대규

- ◆ 학력
- 1988년 연세대 세라믹공학과 공학사
- 1990년 KAIST 재료공학과 공학석사
- 1994년 KAIST 재료공학과 공학박사

- ◆ 경력
- 1993년 ~ 1998년 LG-Philips LCD 선임연구원
- 1999년 ~ 2000년 영국 Oxford Univ. Post-Doc.
- 2000년 ~ 2001년 FDTech 수석연구원
- 2001년 ~ 현재 전자부품연구원 디스플레이연구센터 책임연구원



성명: 김 영훈

- ◆ 학력
- 1999년 서울대 재료공학부 공학사
- 2001년 서울대 재료공학부 공학석사

- ◆ 경력
- 2001년 ~ 현재 전자부품연구원 디스플레이연구센터 전임연구원



성명: 한 정인

- ◆ 학력
- 1983년 연세대 금속공학과 공학사
- 1985년 KAIST 재료공학과 공학석사
- 1989년 KAIST 재료공학과 공학박사

- ◆ 경력
- 1989년 ~ 1992년 삼성전자 반도체연구소 선임연구원
- 1992년 ~ 현재 전자부품연구원 디스플레이연구센터 수석연구원
- 1998년 ~ 2000년 경기대 첨단산업공학부 교수



성명: 이 찬재

- ◆ 학력
- 1998년 한양대 무기재료공학과 공학사
- 2000년 한양대 대학원 무기재료공학과 공학석사

- ◆ 경력
- 2000년 ~ 현재 전자부품연구원 디스플레이연구센터 전임연구원

