

기술 특 집

산화물 및 유기 트랜지스터(TFT)를 적용한 투명 유연 일렉트로닉스

임성일, 오민석(연세대학교 물리학과, 전자소자 연구실)

I. 서 론

21세기는 유비쿼터스 시대를 예고하고 있으며 향후에 응용될 차세대 일렉트로닉스 기술 중의 하나로써 각광을 받을 만한 기술은 “유리와 플라스틱 기판을 적용한 논리회로, 메모리 및 광 디스플레이 일렉트로닉스”를 예로 들 수 있다. 이 같은 차세대 기술은 가볍고 유연하여 내충격성이 있거나 혹은 투명한 기판을 적용한 신개념의 응용소자기술이며 실제 소자공정 온도가 낮고 공정가 역시 저렴한 새로운 과학 기술이다. 즉, 실리콘과 갈륨비소 소자의 개념을 도입하나 실제로는 이러한 실리콘 및 갈륨비소 기판을 대체하여 각종 소자들을 투명, 유연한 유리와 투명 플라스틱 기판 위에 구현하는 것이다. 이를 위한 새로운 물질로써 연구자들은 저온 공정이 가능한 유기 반도체와 산화물 반도체를 선호하고 있다. 이들을 위한 핵심 소자는 유리 및 투명 플라스틱 위에 탑재될 유기 및 산화물 박막 트랜지스터 어레이가 될 것이며 이와 같은 박막 트랜지스터를 기본 소자로 하여 디스플레이 구동회로와 더불어 인버터 논리회로 IC 및 메모리 시스템을 만들어 낼 수 있게 된다. 여기에 발광 혹은 수광소자를 연결한다면 기능이 더욱 강화된 소위 system on plastic (SOP)의 기반기술을 보유하게 되는 것이다. 유기 반도체물질은 무기물질에 비하여 전기적 특성이 열등하며 특히 n-type 반도체는 환경적 대기 불안정성을 갖고 있다는 단점이 있으며 무기 산화물 반도체소자는 p-type 반도체소자의 부재로 야기되는 문제를 안고 있다. 이를 극복하기 위해 이미 여러 선진국의 연구자들은 여러 가지 방식으로 신물질 유기 반도체를 개발하여 문제를 돌파하기 위한 초기 단계의 원천 기술 연구를 진행하고 있으나 실제적으로는 문제를 극복하지 못한 실정이다. 투명 유연 기판 적용 일렉트로닉스는 앞서 언급한 재료/소자/회로제작 기반기술상의 중추적 문제뿐 아니라 저온 공정에서 기판의 기계적 물질적 안정성을 확보해야 하는 공정상의 기반기술을 요구하고 있다. 따라서 차세대 소자의 구현은 산·학·연 연구자들의 집중적인 연구와 노력을 필요로 하고 있다.

본 글에서는 투명 유연 기판을 적용한 일렉트로닉스의 국

내외 최신 연구동향과 기술적 한계, 극복방안과 가능성, 그리고 향후 기술 수요의 전망과 그 파급효과에 대하여 살펴보기로 한다.

II. 투명 유연 일렉트로닉스의 연구동향

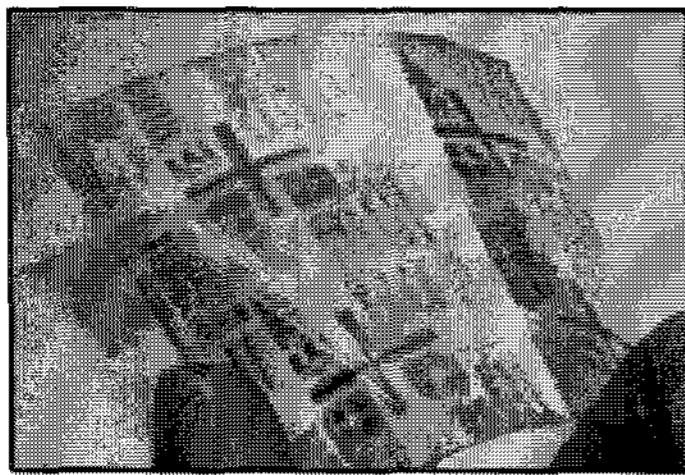
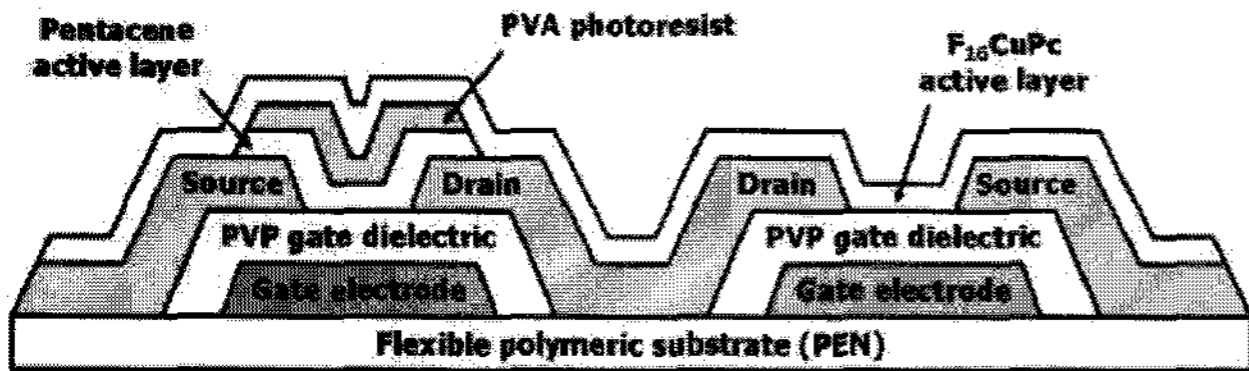
유리 및 플라스틱 기판을 적용한 일렉트로닉스의 중요한 예로써 전세계적인 동향을 살펴볼 때 본 논문에서는 크게 세 가지로 디스플레이 구동 소자, 저 전압 논리회로용 소자, 그리고 메모리 소자의 연구동향을 제공하고자 한다.

1. 디스플레이 구동소자용 TFT

비교적 낮은 전하이동도에도 불구하고 LCD(liquid crystal display)의 구동회로에 안정적으로 사용되어 왔던 비정질 Si(a-Si) 박막 트랜지스터(TFT)는 빛에 의한 열화의 문제와 더불어 공정온도가 섭씨 300도 이상의 고온을 요구한다. 다결정 Si(LTPS: low temperature poly-Si) TFT의 경우는 높은 전하 이동도를 보이고 있으나 대면적 균일 적용이 어려우며 공정가가 높은 반면 아직도 고온 공정을 기반으로 한다. 그로 인하여 새로운 TFT의 연구가 활발하게 연구되고 있는 가운데, 특히 유기물질을 이용한 유기 박막 트랜지스터(OTFT) 분야와 새로운 산화물 반도체를 이용한 ZnO 기반 TFT 분야가 최근 각광을 받아왔으나 유기 TFT의 경우는 전하이동도가 낮아 문제가 되고 있다. 유력한 대안인 ZnO 기반 TFT로써는 일본 동경공업대학의 Hosono 교수, 포르투갈 FCT-UNL 대학의 Fortunato 교수팀, 미국 Dupont사, Oregon State 대학의 연구가 가장 활발하며 국내 연구도 전자통신 연구소(ETRI), 삼성종합기술원, 광주 과기원, 연세대학교 등에서 진행되고 있다. 디스플레이 구동용 산화물 TFT는 산업적으로 AMOLED(active matrix organic light emission device)의 구동소자 응용에 초점을 두는 바, 전기적으로 안정하고 높은 이동도를 갖는 투명 TFT 소자를 목표로 집중 연구되고 있다. (자세한 내용은 본지 2007년 12월호 참조^[1])

2. TFT를 이용한 저 전압 논리 회로용 소자

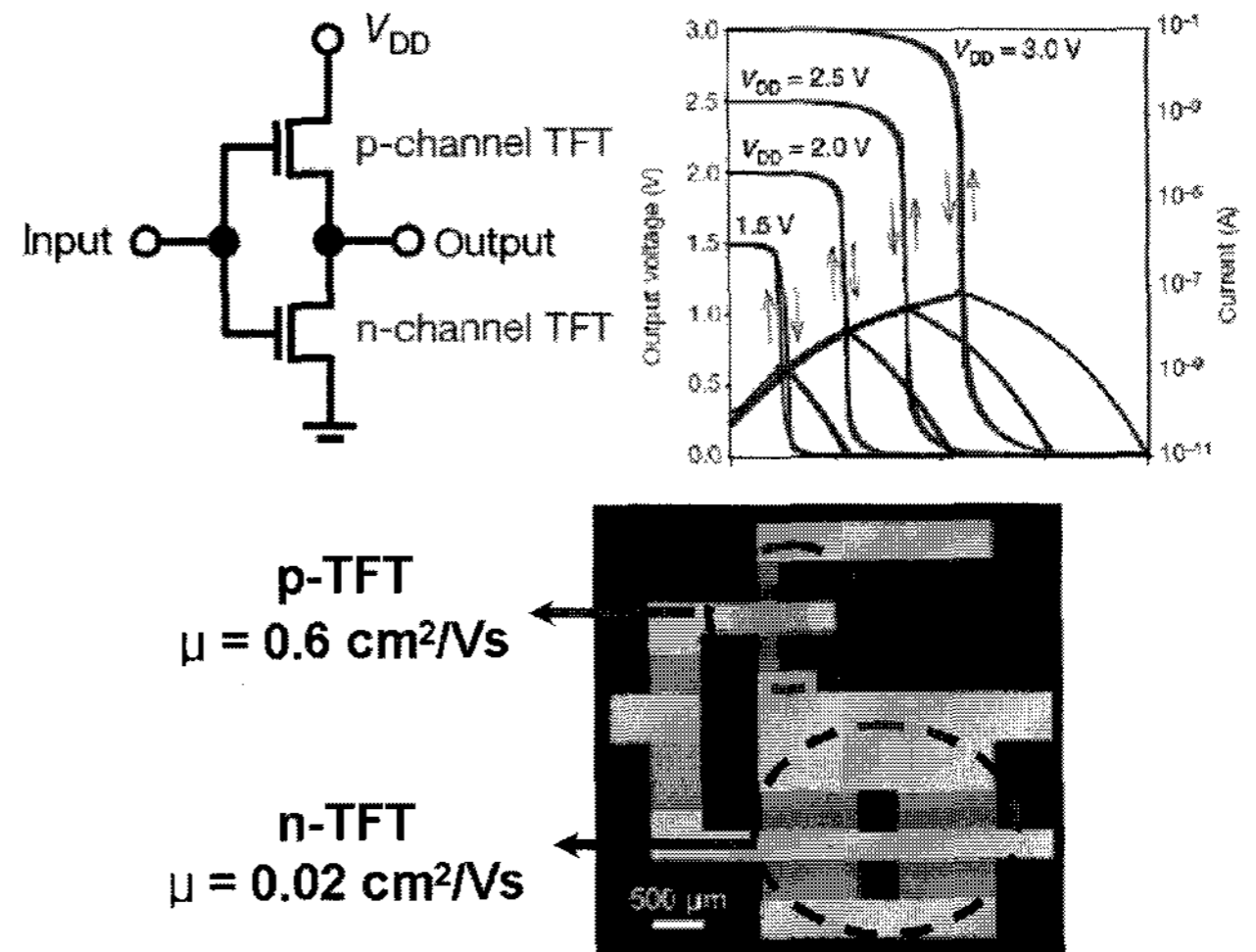
논리 소자연구는 논리회로의 기본 소자인 인버터의 개발을 중심으로 이루어지고 있으며 유기 TFT(OTFT) 소자와 ZnO와 같은 무기 TFT 소자를 응용하고 있다. 그러나 유기 소자와 무기소자는 각각 장 단점이 분명하여 현재까지도 연구단계에 있다. 다음은 각각의 특성을 소개한다.



[그림 1] 유기 n-type과 유기 p-type을 사용한 저 전압구동 CTFT(독일 Infineon, IEEE Transactions on Electron Device. 2005년^[2])

OTFT 적용 논리 인버터 소자

유리 또는 플라스틱 기판 위에 상온에서 제작 가능하므로 광범위하게 연구되어져 오고 있는데, OTFT 단위소자 연구는 현재 활발히 연구되어져 있고, 새로운 연구그룹들에 의해서 계속적으로 연구가 진행되고 있는 반면, 근래에 와서는 이러한 OTFT를 유리 및 플라스틱 기판에 적용한 논리회로 구현을 위하여 연구되어져 오고 있지만, OTFT 소자는 주로 p-type의 전도성만을 갖고 있는 반면 적합한 n-type 유기물질의 부재로 인하여 load-resistance 인버터 혹은 p-type 한 가지의 전하타입만을 사용한 OTFT 적용 인버터 소자가 보고된 바 있다. (미국 Pennsylvania 주립대학, 영국 Cavendish Lab. 등.). 최근 들어서는, 저 전력 소모, 소자설계의 용이성 등을 특징으로 하는 complementary 소자를 얻고자 n-type과 p-type 반도체 활성층을 사용하여 저 전압구동 Complementary-TFT(CTFT) 소자가 연구되어 보고되었다. (독일 Infineon, 벨기에 IMEC, 미국 North Western 대학 등 [그림 1] 참조.) 특히 저 전압 구동 유기 CTFT의 최신 보고는 [그림 2]에 보여진 대로 n-type 유기 반도체의 저 이동도를 보상하는 방법으로 n-channel TFT의 구조를 p-channel TFT에 비하여 대면적화하였다. 즉, n-channel 소자의 channel width(W)와 length(L)의 비율을 조절하여 전하이동도의 차이를 보상하고 있다.^[3] 이와 같은 소자는 3V 이하의 저 전압에서 동작하며 그 전압이득 곡선의 특성이 매우 양호하여 투명 유연 기판 적용 CTFT 제작의 가능성을 보여주었던 것이 사실이다. 그러나 더불어 유기 CTFT 인버터 소자는 p-type 소자



[그림 2] Organic CTFT 인버터 소자, Klauk et al. Nature 445, 745(2007)

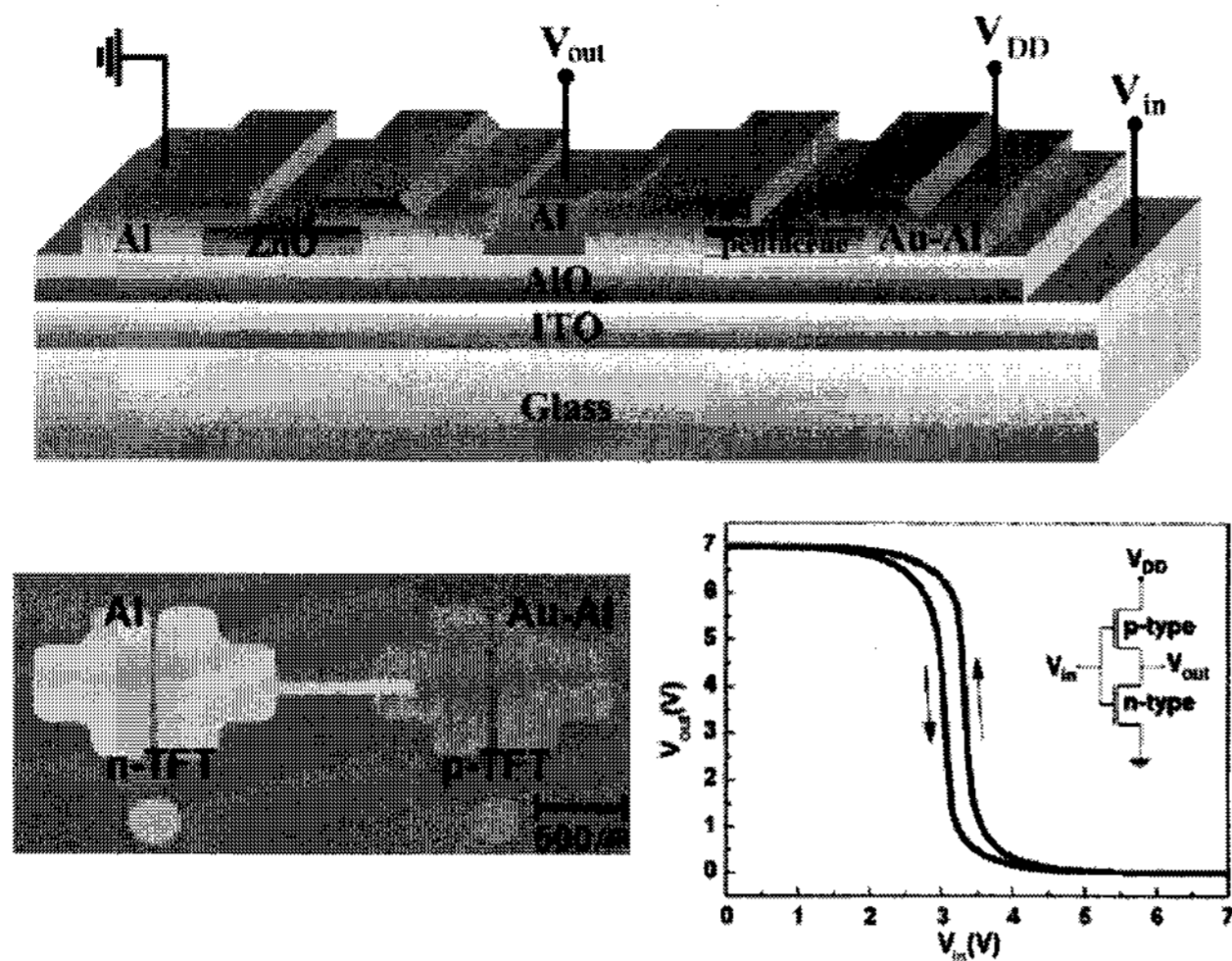
지역과 n-type 소자지역 면적이 크게 차이가 나므로 소자설계의 용이성이 떨어지고 n-type 유기물질이 p-type에 비하여 대기노출 시 물질의 열화 현상이 심각하므로 실제 소자로서의 적용에는 문제가 있는 실정이다.

산화물 TFT 적용 논리 인버터 소자

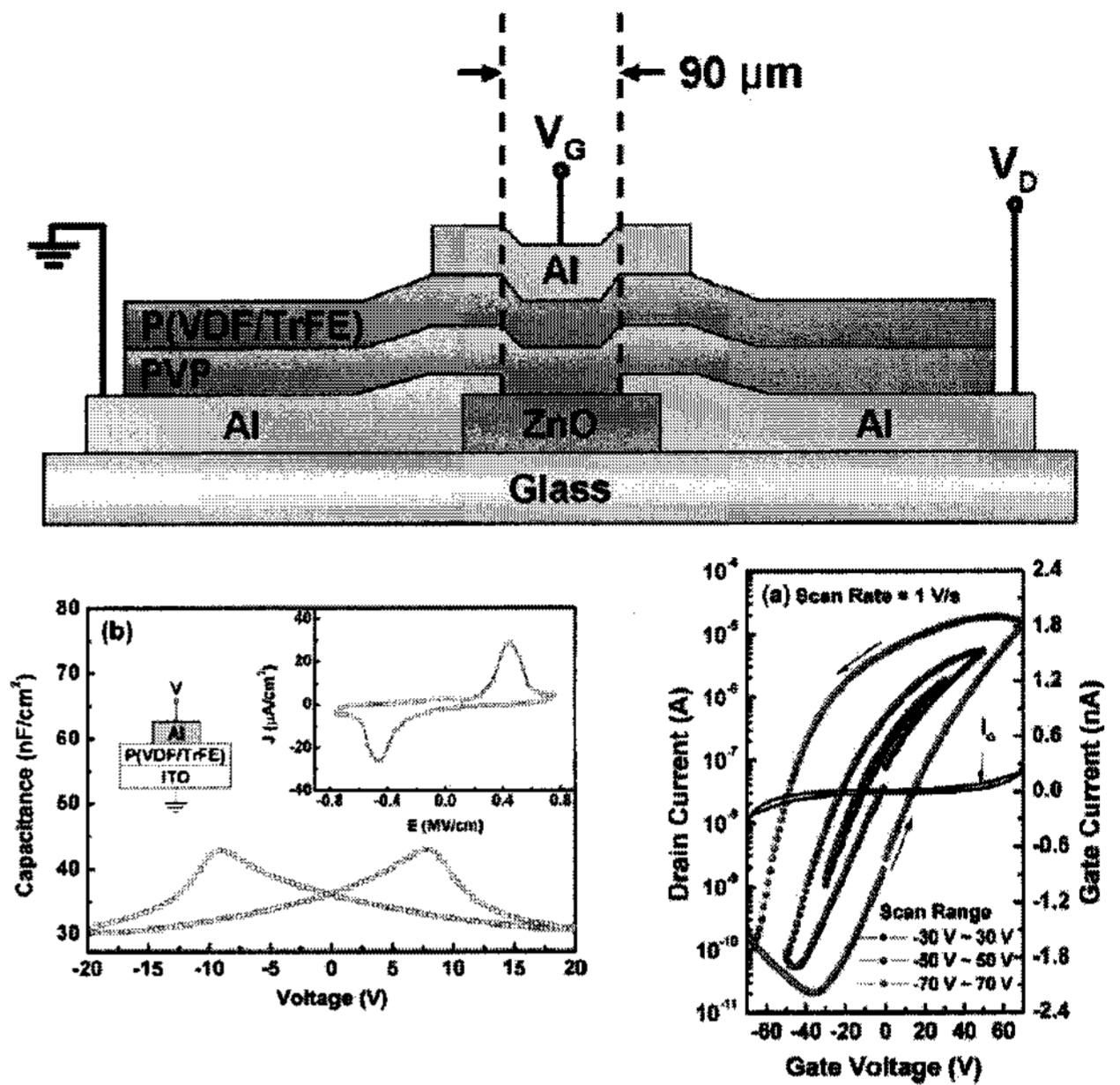
n-type ZnO의 경우에는 저온 공정이 가능하고, a-Si에 비하여 높은 전하이동도(1~20cm²/Vs)를 나타내기 때문에 최근 디스플레이 구동소자로서 각광을 받고 있고, ZnO 계열 물질의 높은 투명도와 높은 전도도 때문에 투명 전극 및 소자로서의 연구도 활발히 진행되고 있다. 그러나 ZnO 계열 소자의 연구에 있어서는 단위 소자의 성능에만 집중적으로 연구되어지고 있고, 디스플레이 구동 소자로서의 적용을 제외하고는 응용소자로서의 연구는 전무한 실정이다. 특히 CTFT로의 적용은, 사용 가능한 안정적인 무기 p-type TFT 소자가 부재한 이유로 현재까지 보고된 바 없다. 그러나 만약 p-channel 산화물 TFT의 실현이 이루어진다면 가장 안정적이면서도 투명한 논리 인버터 소자개발을 목전에 두게 된다.

무기 n-channel TFT와 유기 p-channel TFT의 하이브리드 CTFT 소자

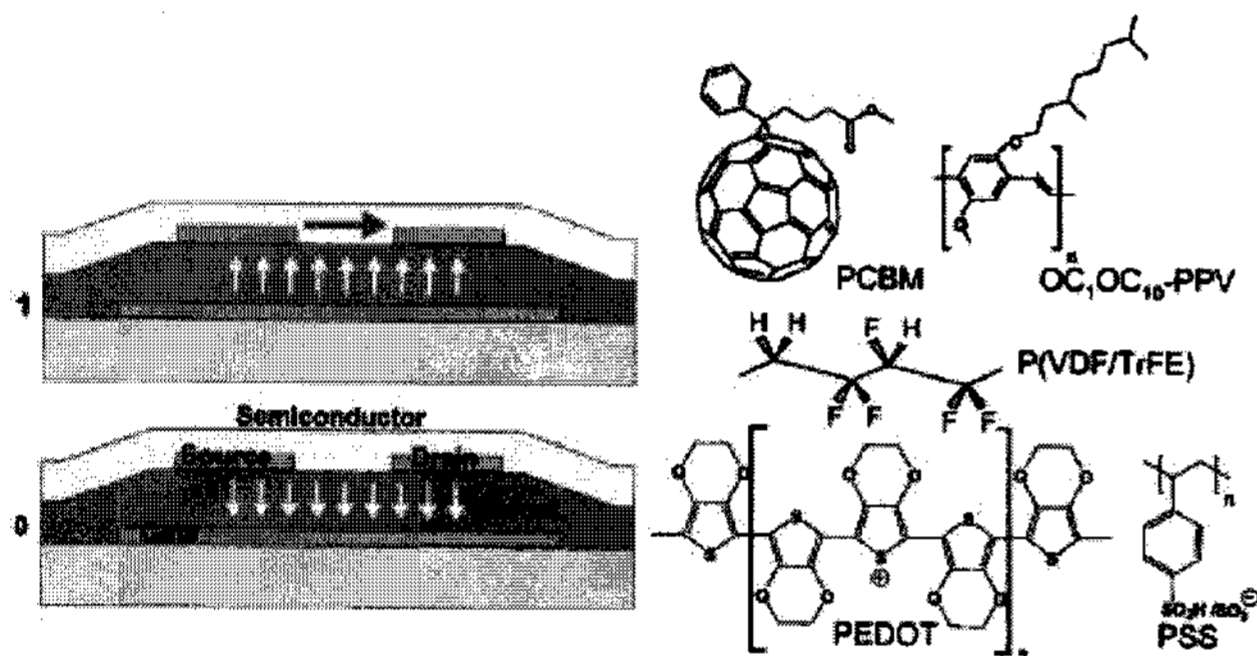
유기 및 무기 반도체 채널을 따로 이용할 때 나타난 한계 상황을 극복하기 위한 방법으로 최근 한국과 일본의 연구기관에서 하이브리드 채널을 이용하는 CTFT 연구가 보고되었다. 즉, 안정적인 무기 n-channel을 이용하면서 역시 안정성이 잘 알려진 유기 p-channel TFT 소자를 사용하는 방법이다. 일본 동경대학의 2007년 연구는 n-type C60 박막을^[4], 한국 연세대의 경우는 n-type ZnO 박막을 p-channel pentacene 유기막과 함께 사용하였다.^[5] 이 경우 n-channel과 p-channel의 면적과 W/L 비율을 동일하게 적용할 수 있으므로 CTFT 소자에 대한 대기 안정성과 더불어 소자설계에 용이성을 더하여 주는 효과가 있었다.



[그림 3] 유리 기판 위에 제작된 유기/무기 하이브리드 complementary 박막 트랜지스터(CTFT) 인버터 논리소자의 구조 및 특성 (Appl. Phys. Lett. 2007년^[5])



[그림 5] P(VDF/TrFE) 유기 강유전 막을 이용한 ZnO 산화물 비휘발성 ferro-TFT 소자의 개략도 및 전기적 특성 (Appl. Phys. Lett. 2007년^[7])



[그림 4] 유기 TFT와 강유전체 폴리머를 이용한 고 전압 비휘발성 메모리 소자 모식도 (네덜란드 Phillips 연구소, Appl. Phys. Lett. 2005년^[6])

[그림 3]은 연세대의 연구 예를 보여주며 그들의 n-ZnO channel 및 p-pentacene channel CTFT는 7V 이하의 저전압에서 동작 가능하였다. 이와 같은 하이브리드 채널 CTFT 소자는 현재까지 7V 정도의 전압에서 작동하나 유기 n-type 물질에 비교하여 산화물 ZnO의 대기 안정성이 인정되므로 향후 개발가능성이 크다.

3. 비휘발성 메모리 소자

비휘발성 메모리 소자에 대한 연구는 유기물 반도체와 강유전체 폴리머 절연막을 이용하는 OTFT 소자를 가지고 2004년 이후 네덜란드 Phillips 연구소를 중심으로 몇몇 유럽의 연구 그룹에 의해 적절히 이루어지고 있다. 가장 유망한 유기 폴리머 박막은 P(VDF/TrFE)라는 물질로써 무기 강유전체에 비하여는 다소 떨어지나 유기 유전체로서는 강한 ferroelectric 특성을 보여준다. 다만, 공정조건이 까다롭고 두께가 얇을 시에는 누설전류밀도가 크다는 단점을 가지고 있다. 따라서 당연히 따라오는 한계상황은 메모리 소자의 구동 전압이 최소 20V 이상으로 보통 50V, 100V 정도의

구동 전압이 요구되며 msec 단위의 상대적으로 긴 switching 시간을 필요로 한다는 점에서 큰 한계를 보여주고 있다. 저 전압 구동 비휘발성 메모리 소자의 응용은 아직까지 보고되지 않고 있으며 특히 ZnO 등 산화물 반도체 TFT를 이용한 메모리 소자 응용 역시 전무한 상태이다. 국내의 연구 역시 연세대의 연구팀이 50V 동작 ZnO 강유전 메모리 TFT를 발표한 바 있으며 앞으로 더욱 연구해야 하는 여지를 안고 있다. [그림 4]는 게이트 ferroelectric 강유전 막을 P(VDF/TrFE)막으로 하여 제작한 50V 구동의 비휘발성 메모리 TFT 모식도이다.^[6] 폴리머 채널물질 및 폴리머 유기 전극 물질을 제시한 전면 유기 메모리 소자를 보여주고 있다. 국내 연구에서는 연세대 연구팀에서 이러한 비휘발성 메모리 소자의 누설전류 특성 향상 및 이동도 향상을 위하여 PVP/P(VDF/TrFE) 이중 폴리머막을 ZnO 산화물 TFT 소자의 강유전층으로 적용하여 [그림 5]와 같이 보고한 바 있다.^[7] 즉, ZnO 산화물 비휘발성 TFT소자는 50V 이상의 sweeping 범위에서 가역적인 전기이력곡선을 보여주었으며 Phillips 연구팀의 결과인 누설전류 수백 nA에 비하여 100배 이상 향상된 수 nA 이하의 누설전류와 100배 이상 향상된 전하 이동도로써 0.36cm²/Vs를 보여주었다. 그러나 연세대 연구팀의 소자는 delay 시간이 수초(~5sec)에 이르는 등 메모리 스위칭 속도에 면에서는 매우 저조한 결과를 보여주었다.

III. 투명 유연 일렉트로닉스의 실현 가능성

유연 투명 기판을 적용한 CTFT 논리소자 및 비휘발성 메모리 소자는 RFID, 유비쿼터스형 투명 회로등 소위

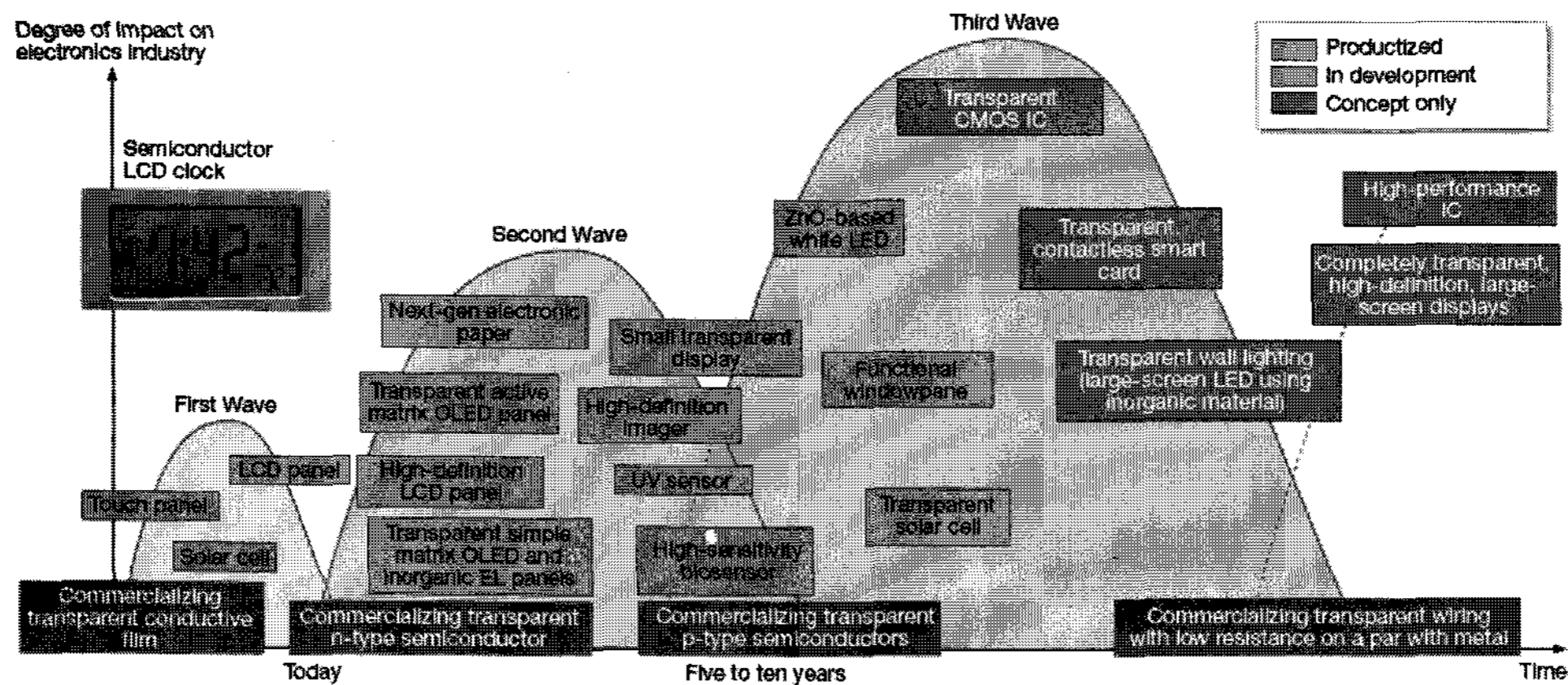


Fig 1 Second Wave in Transparent Electronics Nears; Third Wave on the Horizon The First Wave in transparent electronic devices was the use of transparent electrodes, of ITO or other materials. A number of key products were made possible, such as LCD panels and touch panels. Today development of transparent n-type semiconductors, the Second Wave, is under way, and transparent transistors, ICs and other devices have reached the commercial level. Together with transparent electrodes, they are expected to lead to a range of next-generation displays, cameras, etc, beginning with electronic paper. Beyond n-type devices are transparent p-type semiconductors, and if development proceeds apace it will mean the Third Wave, with low-cost, high-purity white LEDs, and transparent low-dissipation CMOS ICs.

[그림 6] 니케이 일렉트로닉스 아시아사에서 보도된 투명소자의 로드맵 (2007년^{[8])})

glass/plastic electronics의 집적회로를 위한 근간이 되는 기반 소자들이다. 이제까지의 선행 연구결과들로 비추어 볼 때, 현재의 기술 중 유기박막 소자 기술 및 무기박막 소자를 선두로 하되 유/무기 하이브리드 소자 기술까지 적절히 적용한다면 수년 내에 안정적인 저전압 투명 CTFT 소자가 개발될 가능성이 가시적이다. 뿐만 아니라 complementary 소자가 아니더라도 n-channel과 p-channel의 single type 만을 적용하여 저 전압 논리 인버터를 제작하는 기술은 더욱 빠르게 확보될 것으로 사료된다. 다만 유연 투명 기판을 적용 비휘발성 메모리 소자의 경우는 10V 이하 저 전압으로는 현재 세계적으로 성공한 바가 없기 때문에 논리 소자의 경우에 비하면 다소 실현이 어려울 것으로 예상된다. 그러나 강유전층을 이용한 ferroelectric 메모리 TFT 뿐 아니라 유전층에의 charge injection을 이용한 flash 메모리, 가역적 저항변화를 이용한 resistive 산화막 메모리 등이 유리 및 플라스틱 기판위에서 본격적으로 연구된다면 저 전압 구동 비휘발성 메모리 TFT 소자 역시 그 가능성이 가시적이다. 따라서 이미 성공의 단계를 밟고 있는 투명 유연 디스플레이 소자의 시제품을 뒤이어 논리소자 및 메모리 소자가 적용된 투명 유연 일렉트로닉스의 기술적 실현 가능성은 매우 크며 이미 그 전망을 예견하는 자료들은 그 가능성을 더욱 증거하고 있다. [그림 6]은 2007년 “니케이 일렉트로닉스 아시아”의 기사에서 제시된 투명소자의 로드 맵이다. 여기서 예측된 것처럼 투명 CTFT(Transparent CMOS IC) 소자는 제 3의 물결파고의 맨 위쪽에 위치하며 앞으로 그 기술적 완성은 10년후로 예측되고 있다.^{[8])}

IV. 기술 수요 전망

경제 산업계 부가가치 기술 수요

니케이 일렉트로닉스 아시아지의 로드맵에서 예상하는 바와 같이 현재 유비쿼터스용 신개념 소자 연구는 반도체, 디

스플레이 산업 전반과 더불어 RFID 시스템을 활용한 물류 및 제조 분야에까지 그 수요가 확대되고 있는 실정이다. 또한 앞으로 glass/plastic electronics는 우리의 실생활에 파고들어 커다란 파급효과를 줄 수 있을 것이다. 즉, 창문과 같은 투명한 유리에 문화적 공간을 열 수 있고 플라스틱 신용카드가 대용량 비휘발성 메모리의 효과가 있는가 하면 RFID 카드, 디스플레이 효과, 수광 소자 효과, 자외선 센서의 효과와 더불어 구동회로가 내장된 바이오 센서의 제작을 가능케 할 수도 있을 것이며, 유리나 플라스틱 안경의 내부에 정보를 휴대하는 시대가 올 수도 있다. 이러한 기술 수요를 바탕으로 나아가 유연하면서도 저전압으로 구동되는 저가의 박막 소자 개발이 온전히 이루어진다면, 의복의 내부와 외부에 휴대하는 portable/wearable 디스플레이가 현실화되며, 이는 차세대 디스플레이 및 정보산업의 새로운 전기를 열고 과학정보기술의 대중화와 더불어 막대한 수요와 그에 따른 경제적 부가가치를 창출할 것으로 기대할 수 있다.

학계와 연구인력 수요

투명 유연 소자연구의 특징 중 하나는 소자개발에 있어서 전자공학이나 물리학의 범주를 넘는다는 점을 들 수 있다. 즉, 전자공학을 넘어 화학 및 재료공학과 학제 간 연구가 절실한 기술이라는 점이다. 이미 여러 선진국의 학계와 연구소 계열의 연구자들은 소자의 성능을 향상시키기 위하여 소자의 구조를 연구하는 것 뿐 아니라 신 물질을 개발하는 등 여러 가지 방식으로 기 언급된 기술적 한계를 돌파하려는 노력을 쏟고 있는 중이다. 따라서 물리학/재료공학 및 화학/전자공학 학제간 연구인력 양성에의 미치는 연구 및 기술의 파급효과는 매우 크다.

V. 결 론

전술한 바와 같이 투명 유연 기판을 적용한 일렉트로닉스

는 그 집적회로의 개념이 Si 기판 위의 논리소자 및 메모리 소자기술을 연구의 기반으로 하고 있다. 즉, Si 소자의 complementary MOS(CMOS) 회로와 ferro-electric RAM (FeRAM)을 적용한 비휘발성 메모리 트랜지스터는 일찍이 Si 반도체 산업에서 개발되어 왔으며 이와 같은 소자기술의 내용을 유리 및 플라스틱 기판으로 옮겨 유비쿼터스 시대를 대비하는 신소자 기술을 구현하는 것이다. 따라서 차세대 국가 기술 경쟁력 확보와 산업발전에 근간이 되는 원천기술임에 의심의 여지가 없다. 유리 및 플라스틱 기판을 적용한 유기 및 무기반도체 논리회로, 유기/무기 하이브리드 논리회로 및 비휘발성 메모리 소자 연구는 IT 분야의 매우 중요한 핵심 연구이며 특별히 반도체 메모리 기술과 LCD 디스플레이 기술이 성숙된 국가의 경우 성공 가능성이 높은 기술 분야이다. 물리/화학/전자공학/재료공학 등의 조화로운 학제 간 연구가 지속된다면 수년내에도 성숙한 단계에 도달할 수 있다는 밝은 전망을 피력한다.

참고 문헌

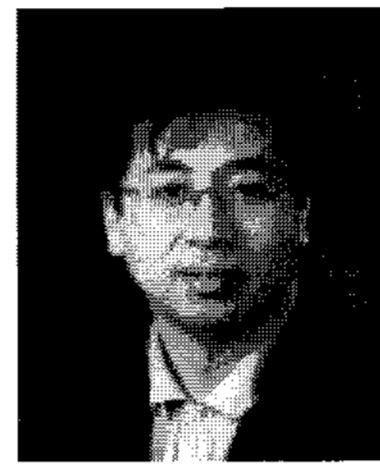
- [1] 황치선, 박상희, 한국 정보디스플레이 학회지 제8권 제6호 (2007) 13.
- [2] H. Klauk, M. Halik, U. Zschieschang, F. Eder, D. Rohde, G. Schmid, and C. Dehm IEEE Trans. Electron Devices 52 (2005) 618.
- [3] H. Klauk, U. Zschieschang, J. Pflaum, and M. Halik, Nature, 445 (2007) 745.
- [4] M. Kitamura and Y. Arakawa, Appl. Phys. Lett. 91 (2007) 053505.
- [5] M. S. Oh, D. K. Hwang, K. Lee, S. Im, and S. Yi, Appl. Phys. Lett. 90 (2007) 173511.
- [6] G. H. Gelinck, A. W. Marsman, F. J. Touwslager,

S. Setayesh, D. M. de Leeuw, R. C. G. Naber and P. W. M. Blom, Appl. Phys. Lett. 87 (2005) 092903.

- [7] S. H. Noh, W. Choi, M. S. Oh, D. K. Hwang, K. Lee, S. Im, S. Jang, and E. Kim, Appl. Phys. Lett. 90 (2007) 253504.

[8] 니케이 일렉트로닉스 아시아, 2007년 11월.

저자 소개



임성일

1980~1984 : 연세대학교 공대 금속공학과 학사, 1984~1986 : 연세대학교 공대 금속공학과 석사, 1989~1994 : University of California, Berkeley 재료공학 (전자재료) 박사, 1995~1996 : California Institute of Technology (CALTECH) 응용물리/전기공학 Postdoc, 1997~1999 : 연세대학교 재료공학부 조교수, 2000~현재 : 연세대학교 물리학과 부교수, 교수



오민석

1993~1997 : 연세대학교 공대 금속공학과 학사, 1997~1999 : 연세대학교 공대 금속공학과 석사, 1999~2000 : 연세대학교 이과대 물리 및 응용물리학과 박사과정, 2000 : (주)SETRI 연구원, 2000~2002 : 일진소재산업(주), 2002~2005 : 삼성전기(주) 선임연구원, 2005~현재 : 연세대학교 이과대 물리 및 응용물리학과 박사과정