인쇄전자 기술동향

Technology Trend of Printed Electronics

융합기술시대의 ICT 부품 연구동향 특집

유인규 (I.K. You) 플렉시블소자팀 책임연구원
구재본 (J.B. Koo) 플렉시블소자팀 선임연구원
노용영 (Y.Y. Noh) 플렉시블소자팀 초빙연구원
유병곤 (B.G. Yu) 신소자/소재연구부 부장

목 차

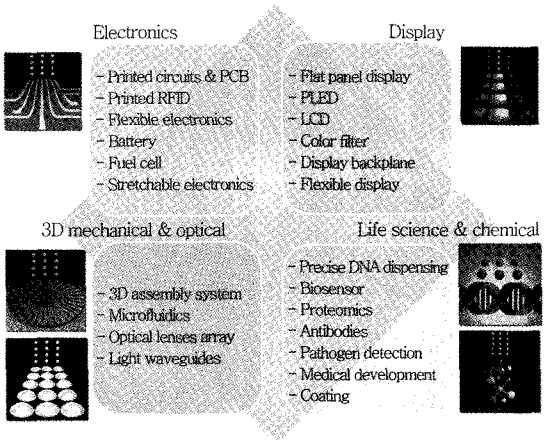
Ⅰ. 서론
Ⅱ. 인쇄전자용 잉크소재 기술
Ⅲ. 인쇄전자의 응용분야
Ⅳ. 시장동향 및 전망
Ⅴ. 결론

인쇄전자(printed electronics) 기술은 인쇄(graphic art printing)가 가능한 기능성전자 잉크소재를 이용하여 초저가격의 프린팅 공정을 통해서 다양한 전자소자를 제작하는 기술로서, 차세대 모바일 IT 기기의 제작에 적합한 전자제품을 생산하는 데 적합한 공정 기술로 인식되고 있다. 현재 기술 수준이 일부 요소 부품을 제작하는 수준에 머무르고 있으나, 여러 가지 잉크소재 및 다양한 초미세 인쇄공정 기술의 개발이 진행됨에 따라 향후 다양한 공정 분야에 적용될 것으로 예상되며, 궁긍적으로 전자제품을 생산하는 기존 반도체 공정을 대체하는 공정으로 자리매김을 할 것으로 예상된다. 특히 인쇄공정 기술은 저온에서 공정이 가능한 기능성 잉크소재들의 개발을 통해서 유연한 플라스틱 기판에 전자소자를 제작하는 플렉시블 전자소자(flexible electronics) 기술과 높은 공정 결합성을 지니고 있으며 이들 공정을 결합하여 향후 연속 공정(roll-to-roll)의 구현이 가능할 것으로 예상된다. 본 기고문에서는 이러한 인쇄전자 기술의 개발동향에 대해서 기술하였다.

© 2009 한국전자통신연구원

Ⅰ. 서론

인쇄전자 기술은 용액공정이 가능한 다양한 기능성 잉크소재(functional ink materials)를 직접 인쇄공정(graphic art printing)을 이용하여 다양한 전자소자를 제작하는 기술이다. 용액을 기반으로 하는 인쇄 기술은 인류가 잉크를 통해 방대한 양의 정보를 종이 위에 인쇄하면서부터 약 천 년 동안 사용되어 왔다. 이러한 인쇄기술은 최근에 개인용 컴퓨터의 발달과 함께 매우 빠른 속도로 발전하여 현재 누구나 쉽게 전문적인 인쇄물을 회사나 가정에서 만드는 시대가 도래하게 되었다. 이러한 인쇄기술은 단순히 문서를 인쇄하는 수준을 넘어서 용액상으로 공정이 가능한 여러 기능성 잉크들이 개발되면서 여러 가지 제품생산에 응용되고 있다((그림 1) 참조). 그 중 대표적인 분야가 인쇄기술을 이용하여 다양한 전자소자를 제작하는 인쇄전자 기술이다. 인쇄공정을 통해서 전자소자를 제작하면 기존공정에 비해서 여러 가지 장점을 지니고 있다. 우선 값비싼 진공 장비 없이 다양한 공정이 가능하여 공정 비용을 획기적으로 낮출 수 있으며, 연속공정을 통해서 공정 속도 또한 증대시킬 수 있다. 또한 공정을 유지하는 데 사용되는 전기 등 각종 에너지의 소비를 줄여서 환경 친화적인 공정이 가능하며, 원하는 부분에만 선택적으로 전자소자의 제작이 가능하므로 불필요한 화학적인 폐기물의 배출을 최소화 할 수 있다. 이러한 다양한 장점을 지니고 있는 인쇄전자 기술은 현재 다양한 요소부품 제작 공정에 적용하는 단계에 있으며, 향후 모든 전자소자나 제품을 제작하는 공정에 적용될 것으로 예상된다. 특히 인쇄공정 기술은 많은 잉크소재들이 저온에서 공정이 가능하여서 유연한 플라스틱기판 위에 전자소자를 구현하는 플렉시블 전자소자(flexible electronics) 기술과 매우 높은 공정 적합성을 지니고 있어서 향후 플렉시블 전자소자 공정 기술로 사용될 수 있는 높은 가능성을 지니고 있다.



(그림 1) 인쇄기술의 다양한 산업적 응용분야

Ⅱ. 인쇄전자용 잉크소재 기술

1. 개요

인쇄공정이 가능한 기능성 전자 잉크의 개발은 다양한 전자소자를 제작하기 위해서 가장 핵심적인 요소라고 할 수 있다. 이러한 제작 방법을 가능하게 하는 기능성 잉크소재는 전기적인 특성에 따라서 크게 도체, 반도체, 또는 절연체 잉크로 나눌 수 있다. 이들 잉크소재를 inkjet printing이나 기타 다른 여러 직접 인쇄법을 통해서 전자회로를 다른 패터닝 방법 없이 기판에 직접 인쇄하여 제작하는 개념을 바탕으로 하고 있다. 이에 따라서 기존의 포토 리소그라피나 다른 여러 고가의 진공공정이 없이 비교적 저렴한 공정단가로 전자소자 제작이 가능하다.

이러한 방법을 통해서 전자소자를 제작하기 위해서 가장 중요한 재료적인 요구사항은 다음과 같다. 우선 잉크재료가 다양한 용매에 높은 용해도를 가지며 안정적으로 분산되어야 한다. 원하고자 하는 소자에 적용하기 위해 필요한 전기적 물성을 보유하고 있어야 하고 재료의 생산 단가가 낮아야 하며, 플렉시블한 전자소자에 적용하기 위해 공정온도도 비교적 낮아야 한다. 이러한 공통적인 요구사항 외에도 각 재료의 기능에 따른 다양한 요구사항을 만족시켜야 하며 이에 대해서 아래에서 각 재료별로 구체적으로 언급하고자 한다.

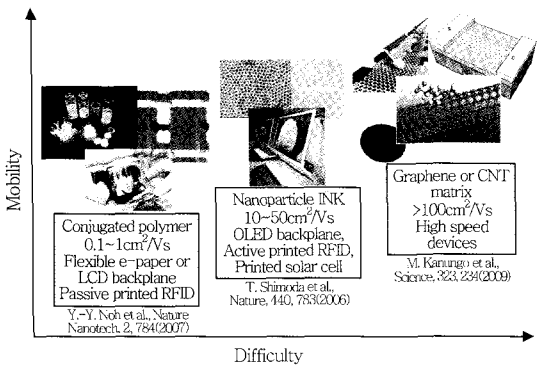
© 2009 한국전자통신연구원

2. 반도체 잉크소재 기술

반도체 잉크재료는 인쇄기술을 통해서 제작되는 각종 전자소자의 활성층으로 주로 사용되는 핵심재료로서 소자의 성능(이동도나 메모리 특성 등)에 가장 중요한 영향을 미치기 때문에 현재 가장 활발히 연구되고 있는 재료이다. 반도체 잉크재료는 재료의 화학적인 성분상 유기물기반 반도체 잉크재료와 무기물기반 반도체 잉크재료로 나뉠 수 있다. 유기물 반도체 잉크재료는 공액성 분자(conjugated molecules)나 carbon nanotube(CNT) 혹은 graphene 등 탄소기반 재료를 들 수 있고, 무기물 잉크재료는 금속 산화물이나 실리콘 용액 기반 잉크를 꼽을 수 있다. 이들 각각의 반도체 잉크재료는 전하의 물리적 특성이나, 얻을 수 있는 전하의 이동도가 각각 다르며 이에 따라서 응용하고자 하는 분야도 조금씩 차이를 지니고 있다((그림 2) 참조).

이중 유기물 반도체 재료는 가장 낮은 전하의 이동도를 얻을 수 있으며, 물질의 전기적인 특성상 이론적으로 수십 cm^2/Vs 이하의 전하 이동도만이 가능하며 실제로는 인쇄공정 등 용액공정을 통해서 0.1~1cm^2/Vs 정도로 성능만이 현재까지 보고되었다.

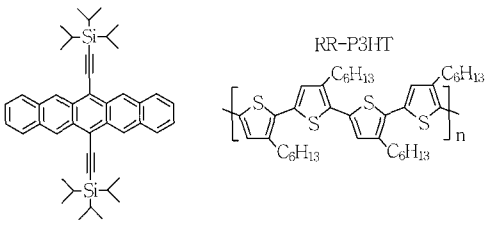
따라서 유기반도체 잉크의 대표적인 응용분야는 기존의 무정형 실리콘(amorphous silicon)이 적용되던 전자종이, LCD 디스플레이의 백플레인용 트랜지스터나 일부 수동형 RFID tag의 디지털 회로 내의 트랜지스터 등 비교적 제한적인 응용분야에만 적



(그림 2) 다양한 반도체 잉크소재와 전자이동도

용될 것으로 인식되고 있다. 인쇄공정이 가능한 유기물 반도체 재료는 물질의 분자량에 따라서 저분자 재료와 고분자 용액 재료로 나뉠 수 있다. 저분자 재료는 고분자 재료에 비해서 비교적 손쉽게 결정성을 얻을 수 있어서 보다 높은 전하 이동도를 보여주고 있다. 최근에 가장 활발히 연구되고 있는 재료는 TIPS pentacene이다((그림 3a) 참조). TIPS pentacene은 진공 증착용 유기물 반도체 재료로 널리 알려진 pentacene에 용해도가 가능한 TIPS라는 작용기를 붙여서 용액공정이 가능하도록 만든 유기반도체 잉크 재료이다. TIPS pentacene은 용액공정을 통해서 0.1~2cm^2/Vs 정도의 비교적 높은 전하의 이동도를 보여주고 있으며 이는 고분자 반도체 잉크보다는 높은 이동도에 해당한다[1]. 하지만 단분자 기반의 유기물 잉크재료는 비교적 낮은 분자량으로 인해서 용액의 점도가 낮고, 이것으로 인해서 coffee strain effect 없이 균일한 두께의 박막을 얻기도 어려우며, 제조된 반도체막의 결정성의 균일도 또한 상대적으로 낮다. 따라서 이러한 물질들로 제조된 트랜지스터는 일반적으로 낮은 성능의 균일도를 보여준다.

고분자 반도체 재료는 단분자 재료에 비해서 인쇄공정에서 많은 장점을 지니고 있다. 고분자 재료는 제조된 용액의 점도가 비교적 높아서 인쇄공정으로 제작된 소자의 균일성이 상대적으로 높다고 할 수 있고 이는 인쇄공정을 통해서 대면적 회로를 제작하는 데 매우 적합하다고 할 수 있다. 또한 고분자 재료는 상대적으로 비교적 높은 열 안정성을 보여준다. 하지만 고분자 반도체 소재가 갖는 이러한 장점들에도 불구하고, 현재까지 개발된 고분자 반도체



(a) TIPS-pentacene (b) P3HT

(그림 3) 현재 대표적으로 사용되는 유기 반도체 잉크 재료들

© 2009 한국전자통신연구원

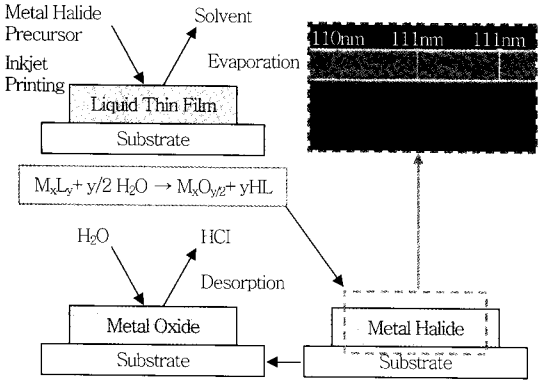
는 기존에 보고된 단분자에 비해 그 종류가 작은 편이며 성능 면에서도 10배 정도 뒤쳐져 있는 상태이다[2]. 이는 고분자 재료가 갖는 복잡한 물리화학적 특성들에 기인하는데, 다시 말해 거대한 분자 사슬들로 이루어진 소재를 분자단위에서 완벽히 컨트롤하여 최적의 박막구조를 형성하고 이를 통해서 높은 성능을 구현하기가 매우 어렵기 때문이다. 특히 인쇄공정과 같은 용액상태로 되어 있는 재료를 통해 박막을 형성할 때 이러한 어려움이 증대된다. 더구나 고분자를 포함한 유기반도체가 갖는 고유한 전하 생성, 이동, 결합 메커니즘이 완벽히 규명되지 못한 상황이며, 유기화학적으로 순도 높은 고분자반도체 소재를 합성하고 정제하는 데 상당한 노하우가 요구된다. 반도체는 수 ppm 이하의 낮은 농도의 불순물에 의해서도 심각한 소자성능 저하를 가져오기 때문에 순수한 재료의 합성 및 정제기술은 고성능소자를 제작하는 데 반드시 필요하다. 고분자 반도체를 잉크젯 프린팅 공정을 통해서 제작한 트랜지스터는 통상 0.1cm^2/Vs의 전하 이동도를 보여주고 있으며, ETRI의 본 연구그룹에서 0.5cm^2/Vs 이상의 높은 전하 이동도를 보고하여 전세계적으로 가장 앞선 결과를 보유하고 있다[3].

무기반도체를 이용한 잉크소재는 유기반도체소재에 비해서 비교적 높은 이동도를 보여주고 있으며 크게 나노입자 형태로 되어 있는 잉크와 전구체(precursor) 형태로 되어 있는 졸-겔 재료로 나뉠 수 있다((그림 2) 참조). 나노 입자 형태로 되어 있는 무기 반도체 잉크는 CdSe 등 화합물 반도체 나노입자나 ZnO 등 금속 산화물 나노 입자 혹은 실리콘 나노 입자 등이 보고되었다. 이와 같은 무기물 반도체 나노입자는 우선 무기반도체 재료를 전구체 등을 통해서 나노입자 형태로 만들고 그들의 표면을 용매에 잘 분산되도록 하기 위해서 다양한 분산재를 화학적으로 부착하여 잉크화하고 있다. 하지만 현재 기술수준에서 이들 잉크의 분산도나 장기간의 분산 안정성 등은 유기물 반도체 잉크재료에 비해서 상대적으로 낮다.

이러한 무기 나노 입자 잉크로 제조된 트랜지스터가 주로 보여주는 전하의 이동도는 현재 수 cm^2/Vs 정도로 기존의 진공공정을 통해서 얻을 수 있는 이동도에 비해서 상대적으로 매우 낮은 실정이다. 이는 나노입자가 인쇄공정을 통해서 박막을 형성할 때 단결정상이 아닌 다결정상의 박막을 형성하게 되기 때문이다. 따라서 향후 공정 최적화를 통해서 이러한 무기 나노입자 박막의 결정성이나 전하 이동도를 더욱 향상시켜야 할 것으로 사료된다. 무기 나노입자 잉크의 또 다른 단점은 비교적 높은 공정온도에 있다. 무기 나노 입자 잉크의 경우 이를 용액에 분산시키기 위해서 다양한 분산재를 나노 입자 표면에 부착하여야 하며 인쇄공정 후에 이러한 분산재를 제거하고 원하는 재료로만 이루어진 박막을 형성하기 위해서 비교적 높은 온도의 열처리 공정이 뒤따라야 한다. 일반적으로 알려져 있는 열처리 온도는 300℃ 이상이며 최근 영국의 캠브리지 대학에서 ZnO 나노 입자를 이용해서 280℃의 공정온도로 제작된 트랜지스터가 보고된 바가 있다[4]. 이러한 높은 공정온도는 LCD나 AMOLED 등 유리기판에 제조되는 다양한 평판디스플레이에 이러한 재료의 적용이 어렵다는 것을 의미하며 향후 공정온도를 낮추는 노력이 기울여져야 할 것이다. 특히 플라스틱 기판 위에 구현되는 다양한 플렉시블 전자소자에 적용되기 위해서는 공정온도를 낮추기 위한 많은 개선이 요구된다.

금속 산화물 무기반도체의 잉크소재로 고려되고 있는 또 다른 형태는 졸-젤법을 이용하기 위한 전구체이다. 최근 용액공정을 통한 TCO 소재로도 각광받고 있는 metal halide 전구체는 용액상에 다양한 metal halide 전구체를 적절한 비율로 혼합하여 잉크로 제조한 후, 이를 여러 가지 인쇄법을 통해서 박막을 형성한 후 공기 중에 수분이 존재하는 상태에서 고온 열처리 과정을 통한 졸-젤 과정으로 metal oxide로 변형시켜서 원하는 반도체의 물성을 얻게 된다. 이러한 방법을 통해 제작된 금속산화물 박막은 앞서 소개한 무기나노입자를 이용한 박막에 비해서 보다 우수한 전하 이동도인 수십 cm^2/Vs의 이동도를 보여주고 있다. 최근 미국의 오레곤 주립대와

© 2009 한국전자통신연구원



(그림 4) Metal Halide 전구체를 잉크젯 프린팅 방법을 통해 Metal Oxide를 제작하는 방법도와 이를 통해서 제작된 박막[5]

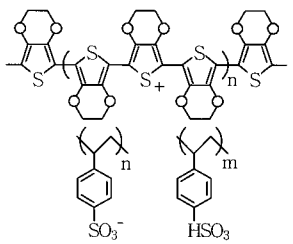
HP가 공동연구로 metal halide precusor를 잉크젯 프린팅하여 박막을 제작하고 이를 통해서 7.4cm^2/Vs의 이동도를 보고하였다((그림 4) 참조). 하지만 이 방법 역시 금속산화물 박막의 결정화를 위해서 400℃ 이상의 높은 공정 온도를 요구하고 있으며, 매우 빠른 반응 속도로 인해서 인쇄공정을 통해서 완성된 박막의 각 성분의 조성이나 defect state의 조절 등을 균일하게 제어하기 어려워서 제작된 박막의 전기적 물성에 대한 재현을 확보하기 어려운 것으로 알려져 있다. 따라서 이 부분에 대한 연구를 통해서 공정온도도 낮추고 전기적 물성의 균일도를 높여야 향후 상업적인 소자에 적용이 가능할 것으로 사료된다.

유기물 잉크재료의 낮은 성능 및 안정성, 무기물 잉크재료의 낮은 분산성과 높은 공정 온도 등 기존 재료의 단점을 극복하기 위해서 새로운 반도체 잉크 재료의 개발에 대한 요구가 꾸준히 제기되어 왔고, 이에 대한 대표적인 재료가 바로 CNT와 graphene 등 탄소를 기반으로 하는 반도체 잉크재료이다. 두 재료는 모두 탄소와 수소만으로 이루어져 있어서 앞선 분류를 기준으로 유기물 재료에 속한다고 할 수 있다. 하지만 기존의 conjugated molecule를 기본으로 하는 유기물 재료와는 전혀 다른 전기적인 특성을 보유하고 있다. 이러한 탄소 기반 잉크의 가장 큰 장점은 이들 잉크가 비교적 낮은 온도(<100℃)에서 공정이 가능하며 매우 높은 전하의 이동도를 얻을 수 있다는 것이다. 따라서 이들 잉크재료를 이용하면 유기물재료의 낮은 성능과 무기물재료의 높은 공정 온도에 대한 문제점을 동시에 해결할 수 있다. 하지만 이들을 이용해서 전자소자를 제작하기 위해서는 다양한 기술적 문제들이 선행되어야 한다. CNT는 보통의 유기물 반도체 재료에 비해서 매우 높은 전하 이동도(>1000cm^2/Vs)를 보유하고 있지만 CNT를 생산할 때 전도성 특성과 반도체 특성을 보유하는 CNT가 일정비율로 동시에 제조되어 이를 간편하게 대규모로 분리할 수 있는 기술이 아직 개발되지 않고 있다. 또한 특정 전기적 특성을 지닌 CNT만을 선택적으로 합성하는 기술 또한 개발되지 않고 있다. 현재 CNT을 반도체 잉크재료로 이용하기 위해서 대표적으로 사용되고 있는 기술이 전도성 CNT의 표면을 화학적으로 처리하여 전도성 특성을 없애는 기술이다. 이는 전도성 CNT와 반도체특성 CNT가 표면화학적으로 다른 성질을 지니고 있고 이를 이용하여 전도성 CNT의 표면에만 화학적인 반응이 가능한 분자를 부착시켜서 전도성 특성을 잃게 하고 이로 인해서 CNT 박막에서 반도체 특성만을 얻고자 하는 것이다. 이 방법은 사실 수 년 전부터 알려져 왔으나 전도성 CNT의 전기적 특성이 완벽하게 제거되기 어려워서 이렇게 제조된 반도체 CNT 박막이 비교적 높은 off-current를 보여주었었다. 최근에는 Dupont에서 이러한 단점을 개선하여 10^5 이상의 비교적 높은 전류점멸비와 $10^4$$cm^2$/Vs의 높은 전하이동도를 보유한 CNT 잉크를 보고하였다[6]. 그들은 Polyolefin의 cycloaddition reaction을 통해서 metallic CNT의 전도성 특성을 보다 효과적으로 제거하였다. Graphene 재료의 경우 보통은 반금속성 특성을 보이나 graphene sheet의 너비가 10nm 이하로 좁아지면서 graphene nanoribbone 형태가 되면 비로서 반도체 특성을 보이는 것을 최근에 발견하였다[7]. 하지만 현재까지 너비가 10nm 이하로 작은 graphene을 대량 생산하거나 분리해내는 공정은 보고된 바가 없다. 따라서 이러한 문제점들이 해결되어야만 graphene이 인쇄공정용 반도체 잉크로 본격적으로 사용될 수 있을 것으로 예상된다.

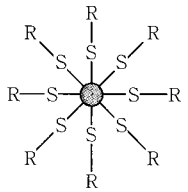
© 2009 한국전자통신연구원

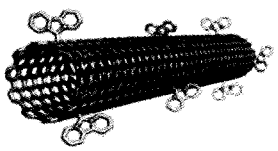
3. 전도성 잉크재료 기술

전도성 잉크재료는 각종 전자소자의 전극, 배선 등에 주로 사용되며 이때 형성되는 전도성 라인에 필요한 가장 중요한 물성은 바로 전도도이다. 가령 예를 들면, 전도성 잉크재료의 인쇄공정을 통해서 LCD 디스플레이의 백플레인의 배선을 형성한다고 하였을 때 형성된 배선 라인의 전도도가 높을 시에는 보다 저항에 의한 RC delay를 최소화 할 수 있어서 빠른 응답의 영상 구현이 가능하다. 그 다음으로 중요한 요구사항은 낮은 공정온도, 낮은 제조단가 및 잉크의 안정성 등을 들 수 있다. 현재 주로 사용되고 있거나 활발히 연구되고 있는 전도성 잉크재료는 전도성 고분자 용액, 금속 나노입자가 분산된 용액, 탄소나노튜브(CNT) 분산 용액 및 이에 대한 복합체 재료를 들 수 있다((그림 5) 참조). 이들 재료는 각각 단점과 장점을 동시에 보유하고 있어서 현재 모든 요구사항을 완벽히 만족시키는 전도성 잉크는 없는 실정이다. 현재 가장 활발히 연구되고 있는 금속 나노입자의 경우 RFID에 응용되기 위해 충분할 만큼 높은 전도도를 보유하고 있으나, 이들을 분산시키기 위해 사용되는 분산재를 제거하기 위해서 비교적 높은 소성온도(>150℃)를 요구하며 제조 단가도 비싼 편이다. 따라서 좀 더 낮은 단가에 제조가 가능한 공정의 개발과 소성온도를 낮출 수 있는 분산재를 개발하는 것이 필요하다. 전도성 고분자의 경우 높은 분산 특성과 낮은 공정 온도 때문에 공정성이 가장 용이하나, 전도도가 금속 나노입자에 비해 턱없이 낮다(1~10S/cm). 따라서 전도성이 높은 전도성 고분자 재료에 대한 연구가 필요하다. CNT 분산 용액은 CNT 자체로는 일반적인 용매에 분산이 어려워 표면이 개질된 CNT를 물 등의 용매에 분산해서 잉크로 사용하고 있다. 금속 나노입자 보다는 낮으나 비교적 높은 전도도(100~1000S/cm)와 낮은 공정 온도(100℃) 때문에 최근에 활발히 연구되고 있으나 CNT의 장기간 안정적인 분산을 얻기가 어려워서 이에 대한 연구가 더욱 필요하다(<표 1> 참조).



(a) PEDOT:PSS 전도성 고분자


(b) 금속나노 입자


(c) 표면이 개질된 탄소나노튜브(CNT)

(그림 5) 현재 대표적으로 사용되는 전도성 잉크재료들

〈표 1〉 대표적인 전도성 잉크재료의 특성 비교

소재	전도도	공정온도	공정성	가격	공기 안정성
전도성고분자 (CPs)	× (1~100S/cm)	○ (<100℃)	○	○	○
금 나노입자	○ (~10^4S/cm)	× (>200℃)	△	×	○
은 나노입자	○ (~10^4S/cm)	× (>150℃)	△	△	△
CNT:CPs	△ (~10^3S/cm)	○ (>100℃)	△	×	○
Graphene: CPs	○ (>10^3S/cm)	○ (>100℃)	×	?	○

현재 모든 재료가 가지고 있는 장단점으로 인해서 한 가지 재료를 통해서 전도성 잉크가 필요한 모든 공정을 만족스럽게 수행하는 것은 어렵다고 할 수 있다.

Ⅲ. 인쇄전자의 응용분야

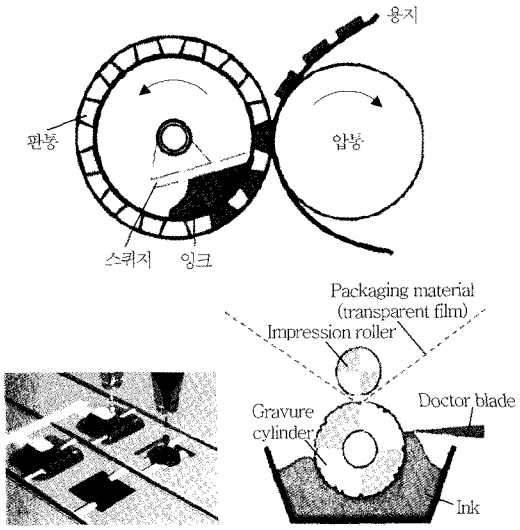
1. 개요

인쇄기술은 다양한 인쇄기술을 통해 트랜지스터 및 전자회로 제작, 센서 및 메모리 제작, PCB 제작 등에 적용되고 있다. 인쇄기술을 통한 트랜지스터 및 회로는 디스플레이를 구동하기 위한 구동소자, RFID의 디지털회로 등에 응용될 것으로 예상된다. 현재는 인쇄기술을 통해 제작된 트랜지스터와 전자

© 2009 한국전자통신연구원

회로 등은 주로 유기반도체를 이용하여 제작되어 왔으나, 앞으로는 앞서 설명한 무기반도체 잉크나 탄소기반 반도체 잉크의 개발을 통해서 다른 잉크로 그 영역이 확장될 것으로 예상된다.

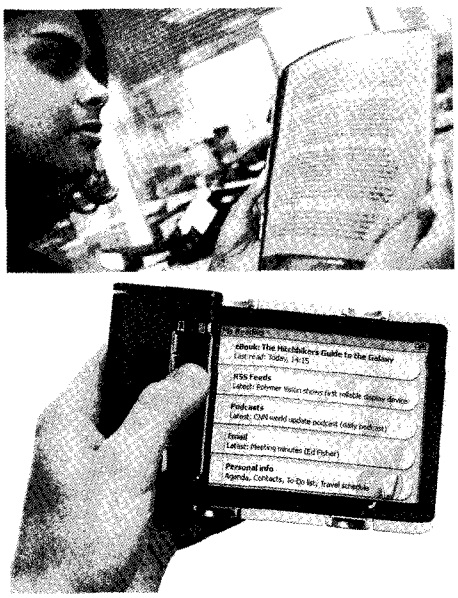
현재까지 인쇄전자의 주관심사인 유기박막트랜지스터(OTFT)를 제작하는 직접 인쇄기술에는 off-set, gravure, flexography, 스크린 프린팅, 잉크젯 프린팅 등을 꼽을 수 있다((그림 6) 참조). 이들 다양한 직접 인쇄법들은 적용 가능한 잉크의 점도, 해상도, 적용분야 등이 각각 조금씩 다르다. 이들 공정에 대한 보다 구체적인 정보는 최근에 보고된 문헌을 통해서 얻을 수 있다[8]. 이러한 직접 인쇄법이 적용 가능한 OTFT 제작공정은 크게 소스/드레인 전극의 형성 및 패터닝, 유기물 반도체 층의 형성, 게이트 절연체 박막의 형성, 그리고 게이트 전극의 형성들을 들 수 있다. 이들 각각의 공정이 요구하는 요구사항이 달라서 앞서 말한 전 공정을 한 가지 직접 인쇄법을 통해서 제작하기 보다는 여러 가지 직접 인쇄법을 적절하게 혼합하여 사용하는 것이 보다 바람직하다고 여겨지고 있다. 가령 유기물 반도체 층의 형성은 높은 전기적 특성을 얻기 위한 유기물 반도체 용액의 농도가 정해져 있어서 아주 높은 점도의 용액으로만 프린팅이 가능한 letterpress나 off-set printing은 적합한 직접 인쇄법이 아니라고 할 수 있다. 또한 유기물 반도체층은 높은 전하 이동도를 얻기 위해 높은 결정성을 얻어야 한다. 따라서 용매의 증발 속도가 비교적 느린 인쇄방법이 결정성을 높이는 데 적절한 방법이라고 할 수 있다. 이러한 직접 인쇄법으로 적용 가능한 OTFT의 제작 공정 중 소스/드레인 전극의 형성 및 패터닝 공정이 기존 포토 리소그래피 공정의 높은 공정 가격과 복잡성, shadow mask 공정의 낮은 해상도 등의 단점들로 인해서 이것들을 대체하기 위해 가장 활발하게 연구되고 있다.



(그림 6) 여러 가지 인쇄공정의 예(위로부터 스크린 프린팅, 잉크젯 프린팅, 그라비아 프린팅)

2. 인쇄공정을 통한 평판디스플레이 제조

인쇄기술이 가장 활발하게 응용되고 있는 분야 중 하나가 디스플레이 제조공정이다. Seiko-Epson은 이미 LCD용 컬러필터의 제조공정을 인쇄기술을 통해서 대체하는 공정의 개발을 완료하여 실제 일본 샤프 등 공정에 적용하였다. 또한 최근에 e-paper, AMLCD나 AMOLED는 화소에 트랜지스터를 하



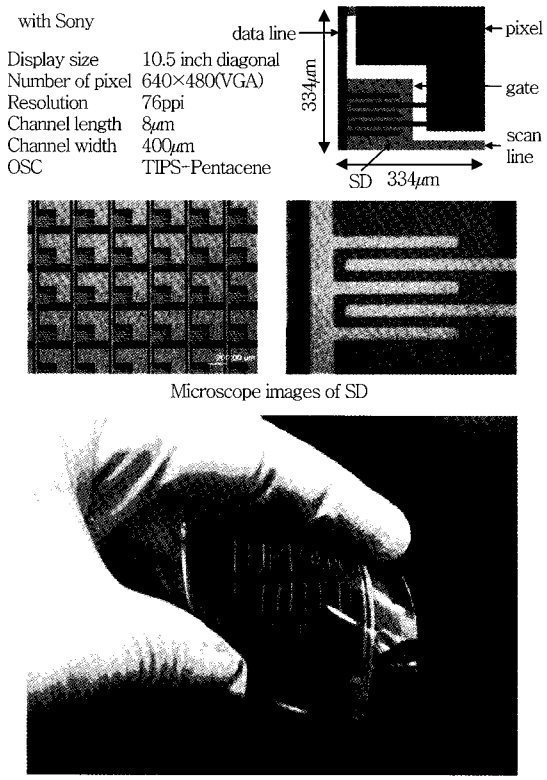
(그림 7) 영국의 Plastic Logics와 네덜란드의 Polymer Vision이 각각 소개한 인쇄공정을 이용해서 제작된 유기 TFT가 Backplane에 사용된 e-paper Display

© 2009 한국전자통신연구원

나씩 포함하는 active matrix 평판 디스플레이의 TFT를 인쇄공정을 통해서 제작하는 연구가 활발히 수행되고 있다. Flexible e-paper의 구동소자를 인쇄공정으로 제작하는 기술은 이미 많은 부분이 완료되어 영국의 Plastic Logics나 네덜란드의 Polymer Vision은 이에 대한 시제품 출시를 앞두고 있다((그림 7) 참조).

또한 일본의 Toppan 잉크는 reverse gravure offset을 이용해서 8㎛의 고해상도를 갖는 소스/드레인 전극을 실버 나노입자를 통해서 형성하고 이를 TIPS-pentacene의 전극으로 사용하여 e-paper display를 시현한 바 있다((그림 8) 참조). 이는 현재까지 알려진 인쇄법의 해상도 중 자기정렬 등의 방식을 이용하지 않고 만들어진 가장 높은 해상도 중 하나라고 할 수 있다.

국내에서는 ETRI를 비롯하여 삼성전자, LG디스



(그림 8) Doppan 잉크에서 보고한 Reverse Gravure Offset을 이용한 고해상도 실버 나노입자 패턴 및 이를 이용한 e-paper Display

플레이, LG화학, 생산기술연구원, KIMM, 경희대, 동아대 등에서 활발히 연구하고 있다.

인쇄기술을 이용한 LCD, OLED 디스플레이의 백플레인 제조는 보다 높은 전하이동도가 필요하므로 현재 주로 사용되는 유기 TFT를 이용하여 구동하기에 무리가 있다. 따라서 앞서 언급한 무기 반도체 잉크나 탄소기반 반도체 잉크의 개발을 통해서 가능할 것으로 예상되나, 현재 기술수준으로는 잉크의 안정성 등 여러 특성 등을 개선하여야 한다.

3. 인쇄공정을 통한 RFID 제조

프린티드 RFID가 연구되고 있는 가장 큰 이유는 낮은 제조 비용 때문이다. Si 단결정을 이용하고 고온 증착하는 절연체와 도체를 사용하는 Si 기반 RFID에 비해 프린팅 가능한 유기물 용액을 이용하는 프린티드 RFID는 가격을 획기적으로 낮출 수 있을 것으로 많은 사람들이 기대하고 있다. 특히 Si RFID tag는 substrate, tag IC, antenna가 packaging에 의해 부착되어야 하는데, 프린티드 RFID의 경우 roll-to-roll process가 가능하여 antenna와 tag IC를 기판 상에 동시에 형성 가능하기 때문에 packaging에 대한 비용도 절감할 수 있다.

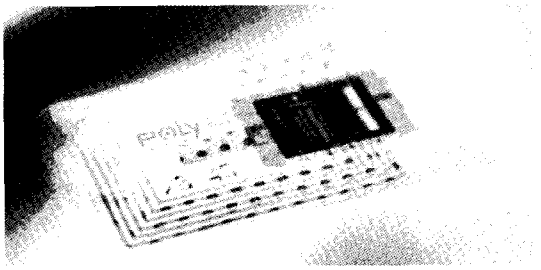
프린티드 RFID는 가격 경쟁력에 대한 장점이 있지만 기술 개발 속도나 현재의 기술 수준을 고려하면 부정적인 측면도 많이 있다. 우선 프린티드 RFID의 긍정적인 측면을 살펴보면 안테나와 IC가 동시에 제작된다는 사실, 제품 packaging에 대한 직접 인쇄 가능성, 싼 가격과 다양한 기판 사용 가능성 등을 들 수 있다. 한편 부정적인 측면으로는 현재의 기술 개발 속도와 수준을 들 수 있다. 동시에 많은 라벨들을 읽어 들일 수 없다는 사실, 수명이 한 달도 안된다는 사실, 최대 인식 속도가 10/sec 정도라는 사실, 최대 인식 거리가 수 cm라는 사실 등이 큰 문제점으로 지적될 수 있다. 즉 다시 말해 아직도 여전히 연구 수준에 지나지 않고 있다. 아마도 상용화 및 시장 진입을 위해서는 당초보다 2~3년 지연된 2018년 이후로 연기될 수도 있다는 주장이 제기되고 있다.

© 2009 한국전자통신연구원

Philips는 6년 전에 polymer electronics를 이용한 RFID IC를 만드는 반도체 회사를 설립하였으나 아직 연구 개발 활동이 진행중에 있다.

현재 시장에서 가장 싼 태그는 약 20센트 정도이다. 실리콘 기반의 태그는 5센트 이하로는 불가능하다. 1센트 혹은 더 낮은 가격은 item level tracking에서는 반드시 달성되어야만 하는 가격이다. Fully printable 방법을 사용한 프린티드 RFID만이 1센트의 가격을 만족시킬 수 있다고 생각된다. Si RFID의 경우 현재는 pallet 수준에서 tracking하고 있는데 향후에는 프린티드 태그를 이용한 item-level tracking이 가능할 것으로 기대하고 있다. 그리고 item-level tracking에서 가장 장점을 보이는 것은 인식 거리나 환경에 대한 저민감도 등에서 13.56MHz 대역이다. 세계 선진 연구기관에서 13.56MHz 플라스틱 RFID 기술 개발에 매진하고 있는 이유가 여기에 있다.

프린티드 RFID 분야에서 가장 앞선 기술력을 보유한 곳이 독일의 PolyIC이다. PolyIC사는 독일의 전자회사 Siemens 지분 49%와 프린팅 회사 Kurz 지분 51%로 만들어진 joint venture 회사이며 현재 세계에서 가장 활발하게 유기물 플라스틱 RFID를 연구 개발중에 있다. 그들은 2005년에 13.56MHz를 시연하고 이를 바탕으로 2008년에는 간단한 메모리를 부착하여 ID tag로 응용된 PolyID 등의 간단한 응용제품을 발표하였다. 2010년부터는 EPC를 제품화 한다고 발표하고 있다. 다시 말하면 2010년에는 13.56MHz의 96bit를 제품화 하여 item-level tracking을 하고자 하는 것이다. 기판으로는 주로 polyester를 사용하고 소스/드레인 및 게이트 전극으로는 polymer 재료, 나노 재료, 금속 등을 사용하고 있고 반도체 재료로는 P3AT를 주로 사용한다. 게이트 절연막 역시 PolyIC가 자체 개발한 polymer blend 기반의 재료이며 소자구조는 staggered TFT이다. 정류 회로에서 사용되는 다이오드는 schottky diode 타입이다. 그들이 개발한 OTFT의 소자 특성은 mobility는 약 0.02cm^2/Vs, I_{on}/I_{off}는 10^5 이상, threshold voltage는 -4V, 그리고 subthreshold slope은 2V/dec이다. 이 특성은 10개월 후에도



(그림 9) PolyIC에서 개발한 13.56MHz, 64bit Printed RFID Tag

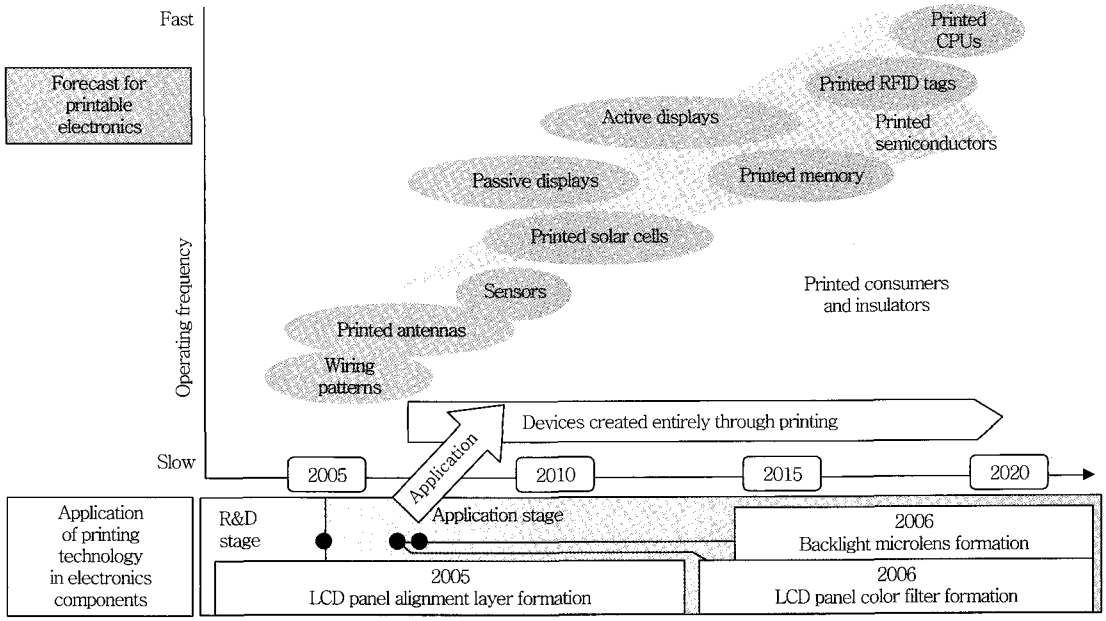
degradation이 관찰되지 않을 정도로 안정하다고 한다. 그리고 그들은 schottky 타입의 rectifier를 상용하여 13.56MHz 이상에서 AC가 DC로 변환되는 것을 확인하였고, RFID의 전원부는 13.56MHz 이상으로 동작하는 특성을 확보하였다. Input이 ±15V AC 13.56MHz 일 때 output은 DC 6V 이상이었다. 이와 같은 특성을 확보하기 위해 저가 프린팅 공정에 포토 리소그라피 공정이 추가된 것으로 판단된다. 2004년에 처음으로 제작된 full printed ring oscillator는 1Hz 정도의 주파수가 얻어졌으나 최근에는 600kHz 이상의 ring oscillator도 보고한 바 있다. (그림 9)는 이상과 같은 소자 특성들을 기반으로 demonstrator를 제작한 것이다. 7.5cm 인식 거리를 가지는 8bit 13.56MHz RFID였다. 이 시작품은 0.1sec의 read time, 3 months 정도의 수명 특성을 보여주었다[9].

그 외에도 Organic ID, IMEC, Holst Center 등에서 관련분야를 연구하고 있으며, 국내에서는 ETRI 플렉시블소자팀을 비롯해서 순천대, 파루 등에서 프린티드 RFID 관련 연구를 수행하고 있다.

Ⅳ. 시장동향 및 전망

니케이 일렉트로닉스에서 2007년 보고한 플라스틱 전자 소자의 기술 개발 로드맵을 (그림 10)에 나타내었다. 이동도 및 주파수 특성이 크게 향상되는 2020년 이후에는 플라스틱 CPU를 비롯하여 대부분의 Si 기반 소자를 대체할 것으로 예측하고 있다. 이 시점에서는 웨어러블 컴퓨터나 두루마리 컴퓨터의

© 2009 한국전자통신연구원



<자료>: Nikkei Electronics, 2007. 3.

(그림 10) 프린티드 일렉트로닉스 기술 로드맵

실제 구현이 가능할 것으로 예상된다. 플라스틱 전자 산업 분야는 2007년부터 시장이 형성되어 점진적인 성장을 이루다가 기술이 성숙될 2013년에는 170억 달러, 2025년에는 2,759억 달러로 급격한 시장 성장이 예측되고 있다(자료: IDTechEx). 또한 iSuppli사의 2006년 예측 자료와 Nanomarkets사의 2007년 예측 자료에 의하면 플라스틱 디스플레이의 시장 규모는 2012년 약 300억 달러에 달하고, 플라스틱 RFID가 45억 달러, 플라스틱 전원 장치가 17억 달러, 플라스틱 센서가 12억 달러, 조명 분야 6억 달러, 기타가 10억 달러로 예측되고 있다[10].

V. 결론

앞 절의 인쇄전자용 잉크소재 기술과 각종 인쇄 기술 및 응용분야에 대해서 살펴보았듯이 인쇄전자 분야는 향후 15년 후에 Si 전자산업분야를 대체할 차세대 소재/소자기술로 전세계적으로 활발히 연구되고 있다. 첫번째 상용화는 LCD 컬러필터 공정 등 여러 산업분야에서 이미 일어나고 있으며, 조만간 OTFT 구동 소자를 채택한 플렉시블 e-paper가 시장에 선보일 것으로 예측되며 향후 수 년 내에 인쇄 기술을 통해 제조된 플렉시블 디스플레이의 출현도 예상된다. 프린티드 RFID의 경우 유기반도체를 이용하여 PolyIC에서 간단한 형태의 RFID를 이미 시현하였으며 향후 생산가격의 저하를 좌우할 roll-to-roll 공정에 대한 연구가 활발히 진행될 것으로 예상된다. 선진국들은 인쇄전자분야에 대한 원천 기술 개발을 위해 정부 주도 연구 개발을 현재 활발히 수행중이다. 미국의 경우 인쇄기술을 이용한 플렉시블 디스플레이가 2000년대 초 MIT 공대 10대 유망 기술로 선정된 이후 국방성의 지원 하에 플라스틱 전자 소자 상용화 센터를 운영하며 체계적으로 플렉시블 디스플레이 및 프린티드 전자 소자 원천 기술 확보에 주력하고 있다. EU의 경우 프린티드 디바이스 클러스터를 형성하여 유기 전자 소재/소자 관련 원천 기술을 확보중이며 일본의 경우 2005년 유기 반도체 소자의 기술적 발전 방안을 제안하고 NEDO 프로젝트 수행을 통해 유기 반도체 전자 소자 상용화 전략을 수립한 바 있다.

특히 이러한 인쇄전자 기술은 플렉시블한 전자소자를 제작하는 공정에 매우 적합하다고 할 수 있다.

© 2009 한국전자통신연구원

최근에는 플렉시블 디스플레이, 프린티드 RFID 등의 인쇄전자 전자 소자의 단 부품 연구를 벗어나 이들 기술을 융합한 IT 부품에 대한 연구가 태동되고 있다. 플라스틱 u-IT 융합 부품 기술로는 초기 단계의 smart card가 1998년 Siemens와 Covion사에 의해 시연된 이래로, 2005년 Philips에 의하여 디스플레이, 메모리/로직, 전지가 집적된 visual smart card가 시연되었다. 그리고 최근에는 일본에서는 플라스틱 IT 융합 부품에 대한 concept generation을 시도하고 있다. 플라스틱 전자 소자 기반으로 차세대 플렉시블 스마트 IOP를 개발하고자 하는 준비가 ETRI에서 현재 진행중이며 이 기술은 DMB, WiBro 등 모바일 단말기기에 초경량, 초박형의 큰 화면과 신기능 서비스를 가능하게 할 것이며, 이 밖에 wearable IT 기술 등 미래 IT 기술을 선도할 기술이다.

플라스틱 일렉트로닉스 기술은 전기, 전자, 반도체, 자동차, 항공 우주, 기계(정밀 부품) 등 다양한 산업에 혁신적 변화를 초래하여 국가 산업 발전 및 고부가가치화의 열쇠가 될 미래 유망 기술이다. 향후 고도 산업화될 미래 사회에서 인간 친화적인 특성을 바탕으로 사회적, 문화적 패러다임의 변화가 기대된다. 플라스틱 일렉트로닉스 관련 원천 기술 확보 및 핵심 부품 소재의 상용화에 대한 정부 주도의 체계적인 지원과 관심이 절실히 필요하다.

● 용 어 해 설 ●

Cycloaddition reaction: '고리화 부가반응'이란 의미로, 선형으로 되어 있는 화합물을 화학반응을 통해서 고리(ring) 형태로 제조하거나 고리 형태의 화합물에 화학반응을 통해서 곁가지를 생성하는 화학반응들을 통칭하여 일컫는다.

약어 정리

AMLCD	Active Matrix Liquid Crystal Display
AMOLED	Active Matrix Organic Light Emitting Diode
CNT	Carbon nanotube
EPC	Electronic Product Code
FPD	Flat Panel Display
IOP	Input Output Platform
OTFT	Organic Thin-Film Transistor
RFID	Radio Frequency Identification
TCO	Transparent Conducting Oxide
TIPS	Bis (triisopropylsilylethynyl)

참 고 문 헌

[1] C.D. Sheraw, T.N. Jackson, D.L. Eaton, and J.E. Anthony, "Functionalized Pentacene Active Layer Organic Thin-Film Transistors," *Adv. Mater.*, Vol.15, 2003, pp.2009-2011.

[2] H. Sirringhaus et al., "Two-dimensional Charge Transport in Self-organized, High-Mobility Conjugated Polymers," *Nature*, Vol.401, 1999, pp.685-688.

[3] Y.-Y. Noh, "High Performance Inkjet Printed Polymer Transistors and Circuits," Plastic Electronics Asia, Taipei, Taiwan, June 9-11, 2009.

[4] B. Sun and H. Sirringhaus, "Solution-Processed Zinc Oxide Field-effect Transistors Based on Self-assembly of Colloidal Nanorods," *Nano Letters*, Vol.5, 2005, pp.2408-2413.

[5] D.-H. Lee et al., "A General Route to Printable High-Mobility Transparent Amorphous Oxide Semiconductors," *Adv. Mater.*, Vol.19, 2007, pp.843-847.

[6] M. Kanungo, H. Lu, G. Malliaras, and G.B. Blanchet, "Suppression of Metallic Conductivity of Single-Walled Carbon Nanotubes by Cycloaddition Reactions," *Science*, Vol.323, 2009, pp.234-237.

[7] X. Li, X. Wang, L. Zhang, S. Lee, and H. Dai, "Chemically Derived, Ultrasmooth Graphene Nanoribbon Semiconductors," *Science*, Vol.319, 2008, pp.1229-1232.

[8] Hargen Kluak ed., Organic Electronics, Materials, Manufacturing and Applications, Wiley-VCH, 2006.

[9] www.polyic.com

[10] Lawrence Gasman, "The Other Flexibility: Flexible Electronics Markets Outside of the Display Industry," *Flexible Displays & Microelectronics Conference & Exhibit*, Phoenix, Arizona, USA, Feb. 5-8, 2007.

© 2009 한국전자통신연구원