

금속 나노입자 프린팅 공정을 이용한 유연전기소자 연구 현황

고 승 환

카이스트 기계항공공학부·응용나노공학연구소

(2010년 8월 3일 투고; 2010년 9월 12일 수정; 2010년 9월 25일 게재확정)

Research Status on Flexible Electronics Fabrication by Metal Nano-particle Printing Processes

Seung Hwan Ko

Applied Nano Technology & Science Laboratory, Mechanical Engineering Dep. KAIST

(Received 3 August 2010; received in revised form 12 September 2010; accepted 25 September 2010)

Abstract

Flexible electronics are the electronics on flexible substrates such as a plastic, fabric or paper, so that they can be folded or attached on any curved surfaces. They are currently recognized as one of the most innovating future technologies especially in the area of portable electronics. The conventional vacuum deposition and photolithographic patterning methods are well developed for inorganic microelectronics. However, flexible polymer substrates are generally chemically incompatible with resists, etchants and developers and high temperature processes used in conventional integrated circuit processing. Additionally, conventional processes are time consuming, very expensive and not environmentally friendly. Therefore, there are strong needs for new materials and a novel processing scheme to realize flexible electronics. This paper introduces current research trends for flexible electronics based on (a) nanoparticles, and (b) novel processing schemes: nanomaterial based direct patterning methods to remove any conventional vacuum deposition and photolithography processes. Among the several unique nanomaterial characteristics, dramatic melting temperature depression (T_m , 3nm particle~150°C) and strong light absorption can be exploited to reduce the processing temperature and to enhance the resolution. This opens a possibility of developing a cost effective, low temperature, high resolution and environmentally friendly approach in the high performance flexible electronics fabrication area.

Keywords : Metal Nanoparticles, Flexible Electronics, Printed Electronics, Inkjet Printing, Nanoimprinting, Selective Laser Sintering

* Corresponding author.

Tel : +82-42-350-3235, Email : maxko@kaist.ac.kr

1. 서 론

유연전기소자(Flexible Electronics)란 구부릴 수 있는 플라스틱, 섬유, 종이등위에 만든 전기소자를 의미하며 대표적인 예로 구부릴 수 있는 모니터(Flexible display), 입을 수 있는 컴퓨터(Wearable Computer) 등이 있다. 현재의 실리콘과 유리 기판 중심의 전자소자들은 특성상 구부릴 수 없고 공정자체가 실리콘과 같은 무기물질에 최적화가 되어있기 때문에 주로 플라스틱을 기판으로 이용하는 유연전기 소자를 제조하기 위해서는 각각의 전자부품 및 기기에 사용되는 소재 및 공정이 새롭게 개발되어야 한다. 유연전기소자는 기존의 전기소자에 비해 다양한 장점을 가지고 있다. 우선 전기소자를 만든 기판을 변형할 수 있기 때문에 차 유리나 헬멧과 같은 다양한 모양의 표면위에 전기소자를 직접 부착할 수도 있고 기존의 무기재료전기소자기판에 비해 굉장히 가볍고, 박형화가 가능하며, 내구성이 커서 깨질 염려가 없는 장점들이 있기 때문에 휴대용전자기기에 최적이다. 이런 외형적인 장점보다도 유연전기소자가 더욱 무한한 가능성을 가지는 것은 경제적인 측면이라고 할 수 있다. 유연전기소자기판은 주로 플라스틱과 같은 유기물질이 사용되는데, 플라스틱은 실리콘, 유리등의 재료에 비하면 비용이 비교가 안될 정도로 저렴할 뿐만 아니라 기판의 대형화가 쉽다는 장점이 있다. 기판의 대형화의 가능성은 기존의 리쓰그래피를 이용한 공정에서 높은 이윤을 얻기 위한 가장 큰 방편이자 문제점이었다. 기존의 리쓰그래피공정을 대형화하기 위해서 고정밀도의 대형 실리콘 웨이퍼나 유리 기판을 만드는 것도 큰 문제점이었지만, 그 큰 기판을 공정중 수용할 수 있는 진공장비의 가격이 천문학적으로 커지는 것도 엄청난 부담이 되었다. 그에 반해 유연전기소자에 이용되는 플라스틱은 대형화가 쉽고 무엇보다도 가장 궁극의 경제적인 공정형태인 Roll-to-Roll 공정(신문을 인쇄하듯이 두루마리처럼 말린 플라스틱 기판을 계속공급하면서 그 위에 패턴을 연속적으로 만드는 공정)이 가능하다는 데 있다.

이런 외형적인 장점과 경제적인 측면만 보더라도 유연전기소자가 가까운 미래에 각광을 받게 될 신기술이란 것은 의심의 여지가 없다. 하지만 현재 유연전기소자의 개발에 가장 큰 발목을 잡고 있는 것

은 현재 전자기기제조에 가장 많이 사용되고 있는 실리콘 위주의 IC(integrated circuit)공정이 유연전기소자를 제조하기 위한 공정에 적합하지 않다는데 있다. 이런 문제점은 기존의 IC공정이 안고 있는 고비용의 문제점을 피할 수 있는 좋은 기회이기도 하지만 새로운 공정을 개발해야하는 부담이 되기도 한다. 기존의 무기물질 위주의 IC 공정은 다양한 고온공정들, 부식성이 강한 화학물질은 쓰는 에칭(etching)공정들을 이용하여서 플라스틱과 같은 유연전기소자기판에는 적당하지 않다. 그리고 비용 측면에서도 진공장비, 포토마스크(photomask), 화학약품 등의 천문학적인 비용의 장비가 필요할 뿐만 아니라 공정이 많은 시간과 노동을 필요로 하기 때문에 적당하지 않다. 그리고 99%이상의 재료가 낭비되며 공정 중 나온 물질들은 독성이 강한 물질들이 대부분이기 때문에 환경적으로도 친화적이지 않다. 따라서 유연전기소자를 만들기 위한 새로운 공정을 개발하려면 위에서 언급한 기존의 IC공정이 안고 있는 다양한 문제점들을 극복하는 새로운 기술이어야 한다(Reginger *et al.* 2004, Ko *et al.* 2007a).

현재 이러한 기존 공정들을 탈피하여 진공증착과 포토 리쓰그래피를 이용하지 않고 저온에서 플라스틱 기판위에 기능성 전기소자를 구현하는 나노물질을 바탕으로 한 직접 패터닝 전자인쇄공정(printed electronics) 공정들이 개발되고 있다. 본 총설에서는 금속 나노입자를 이용하는 다양한 인쇄전자공정의 유연전기소자로의 적용에 대한 연구 동향을 알아본다.

2. 금속 나노입자 프린팅 공정을 이용한 유연전기소자 기술 동향

서론에서 잠시 언급했듯이 기존의 IC공정은 고온 공정들, 부식성이 강한 화학물질은 쓰는 에칭공정들을 이용하여서 플라스틱과 같은 유연전기소자기판에는 적당하지 않다. 뿐만 아니라 기존의 IC공정은 고가의 진공장비, 포토마스크, 화학약품을 쓰며 재료의 낭비가 굉장히 심하고 시간과 노동력이 많이 들기 때문에 저가의 플라스틱 기판을 쓰며 비용절감의 측면을 가지고 있는 유연전기소자의 장점을 무색하게 만든다. 따라서 유연전기소자를 만드는 신

공정은 플라스틱이 견딜 수 있는 저온공정이면서 부식성강한 화학약품을 쓰는 공정이 없고 고가의 진공장비와 마스크를 쓰지 않는 직접패터닝(direct patterning) 기술이어야만 한다. 현재 나노입자의 다양한 직접패터닝 기술이 존재하는데 가장 활발히 연구되고 있는 방법으로는 1) 잉크젯 프린팅(inkjet printing), 2) 스크린 프린팅(screen printing), 3) 나노 임프린팅(nanoimprinting) 등의 wet 방법과 4) laser induced forward transfer(LIFT), 5) micro contact printing, 6) arojet deposition 등의 dry 방법으로 크게 구분된다. 본문은 나노입자의 합성과 특성분석, 나노입자를 이용한 프린팅 공정 동향 소개, 마지막으로 간략한 전망의 순서로 전개된다(Ko *et al.* 2007a).

2.1 금속 나노입자 생성 및 특성 측정

최근, 다양한 나노입자(Nanoparticle)의 제조 공법의 개발과 나노입자들은 가지는 특이한 물리적 특성으로, 나노입자를 이용한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 예로, 금의 녹는점이 1063°C 인데 비해, 2-3 nm 크기의 금 나노입자는 열역학적 사이즈 효과에 의해 녹는점이 130~150°C로 감소되는 현상을 보인다. 이러한 나노입자의 크기에 따른 녹는점 강하현상(size dependent melting temperature drop, Buffet *et al.* 1976)을 이용하면, 전기전도성이 우수한 인터컨넥터 도선을 플라스틱 기판에서 사용 가능한 낮은 온도에서 제작이 가능하다. 특히 전기 신호를 상대적으로 먼 거리로 전송해야하는 매크로일렉트로닉

스(LCD, etc)의 경우에, RC 지연을 최소화하기 위해 선 전기전도도가 높은 물질의 사용이 필수적이다. 이러한 목적으로 대개 금과 은등의 noble metal 나노입자가 취급의 용이성 때문에 실험실에서 많이 사용되고 있으며, 경제적인 측면에서 구리, 알루미늄등의 나노입자도 활발한 연구가 진행되고 있다. 나노입자의 합성방법도 나노입자의 종류만큼이나 다양하며 주로 증발/응축법(evaporation/condensation method), 화학적 액상법(chemical solution method), 마모법(abrasion method)등이 이용되며 대량생산에는 주로 증발/응축법과 마모법이 이용되지만 크기분포가 그리 좋지 않다. 그렇기 때문에 작은 크기분포를 가지는 작은 나노입자를 합성하기 위해서 화학적 액상법이 실험실 레벨에서 주로 이루어지고 있다. 나노입자 합성 과정에서 주로 이용되는 화학적 액상법의 한 종류인 화학적 이상법(chemical two phase method)(Figure 1)는 surface monolayer를 나노입자에 코팅하는 방법으로 나노입자의 크기와 크기분포를 조절하고 유기용매에 분산 시켰을 때 나노입자들끼리의 응집을 막아주어서 오랫동안 나노잉크의 안정성을 높여준다.

합성된 나노입자들은 큰 표면-체적비와 양자 구속 효과(quantum confinement effect) 때문에 벌크물질에서 볼 수 없는 다양한 새로운 전기적(electric), 화학적(chemical), 열적(thermal), 광학적(optical), 기계적(mechanical), 전기화학적(electrochemical), 화학적촉매(catalytic), 자기적(magnetic) 특성을 나타낸다. 특

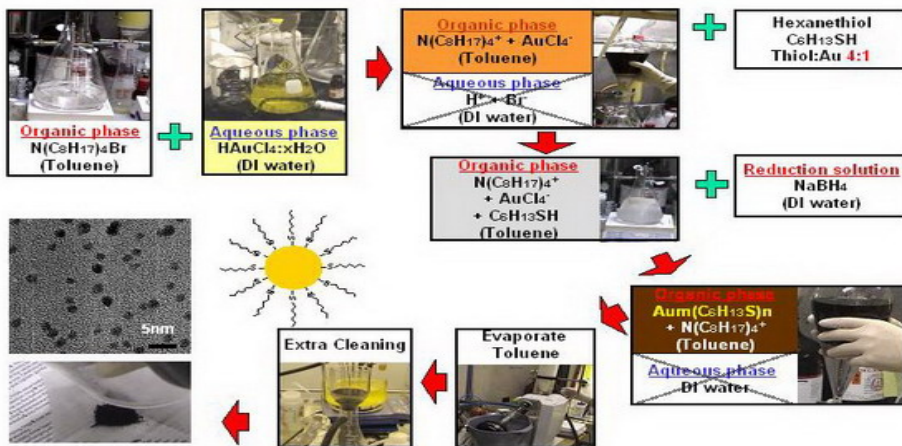


Figure 1. Two phase chemical solution method를 이용한 금 나노입자의 합성방법[Hosteller *et al.* 1998].

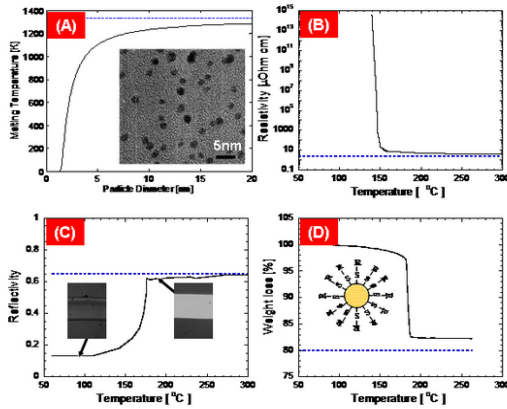


Figure 2. 나노입자의 열적 특성 (A) 녹는점, (B)비저항, (C) 반사율, (D) 질량변화[Ko *et al.* 2007b].

히 유연전기소자 공정을 개발하기 위해 관심을 가지고 있는 특성은 열적, 전기적 특성으로 플라스틱이 손상되지 않는 낮은 온도에서 녹기 시작하여 전기전도도가 굉장히 높아야 한다. Figure 2는 입자 크기에 따른 녹는점 강화현상(Figure 2A), 비저항 감소 현상(Figure 2B), 광학적 성질 변화(Figure 2C), 질량 감소(Figure 2D)을 가해주는 온도변화에 따라 특성을 측정하여 금속 나노입자의 열적-전기적 특성을 측정하였다. 그 외에도 Ko *et al.*[Ko *et al.* 2007c]은 전자투과현미경을 이용하여 작은 나노 입자가 어떻게 녹아서 벌크를 형성하는지 보였고, Pan *et al.*[Pan *et al.* 2008] 은 분자동력학 시뮬레이션을 이용하여 각각의 나노입자가 어떤 시간 안에 녹아서 큰 입자를 형성하는지 예측하였고 e-beam 리소그래피를 이용하여 그 예측값을 실험과 비교하였다.

2.2 금속 나노입자를 이용한 저온 금속 직접 패터닝 방법

다양한 금속 나노입자의 패터닝 방법 중 현재 가장 많이 연구되고 있는 방법은 잉크젯 프린팅 방법이다. 잉크젯 프린팅 방법은 다른 프린팅 방법들에 비해 공정이 훨씬 유연하고 캐드 데이터와 연동하여 쉽게 디자인을 바꿀 수 있는 디지털 패터닝 방법이다. 떨어지는 액적의 크기와 숫자를 압전소자를 이용하여 원하는 시간에 토출할 수 있는 Drop-on-demand(DOD)방식이 주류를 이루었으며 초창기에는 단일 잉크젯 노즐을 이용하는 연구에서 현재는 수

십 개에서 수백 개의 다중 노즐을 이용하여 생산성을 높이는 연구가 활발히 진행되고 있다. 나노입자의 잉크젯 프린팅으로 유연전기 소자를 구현하는 연구는 UC Berkeley의 Subramanian 연구실(Reginger *et al.* 2004)에서 주도적으로 하였다. 하지만 잉크젯 공정만으로 안정적으로 구현할 수 있는 정밀도는 30~50마이크론이어서 고성능의 전기소자를 구현하기에는 다소 무리가 있다. 기존 잉크젯 공정의 정밀도 한계를 극복하고 플라스틱 기판에 열전 손상을 최소화하기 위해 카이스트의 응용나노공학연구실(Ko *et al.* 2007c)에서는 레이저를 국소적인 열원으로 이용하여 잉크젯 프린팅된 금속나노입자의 소결 정밀도를 수백 나노미터까지 증가 시키는 연구를 진행하였다. 오븐을 이용하는 방법은 레이저를 이용하는 방법에 비해 쉽고 저렴하지만 기판위에 열에 민감한 다른 구조물들이 있다면 열손상이 가해질 가능성이 크다. 그에 비해 레이저는 패턴된 나노입자 구조물의 국부적인 용융이 가능하여 해상도를 더 높일 수 있고, 나노입자의 광학적 특성인 surface plasmon mode에서 레이저 흡수가 굉장히 잘 되는 성질을 이용하여 효과적이고 국부적인 에너지 흡수를 통해 열에 민감한 플라스틱 기판의 열손상을 더욱 최소화 할 수 있다. 레이저와 나노입자를 이용하여 유연전기 소자를 만드는 분야는 UC Berkeley/카이스트 응용나노공학연구실에서 처음 발전되었으며 상당히 높은 수준으로 발전되었다. Figure 3은 잉크젯 프린팅된 금속 나노입자를 레이저를 국소 열원으로 이용하는 선택적 공정과 그 공정을 통해 얻어진 플라스틱 기판위에 구현된 유기박막 트랜지스터 배열을 보여준다.

두 번째로 소개할 나노입자 패터닝 방법은 스크린 프린팅과 나노임프린팅이다. 잉크젯 프린팅이 비접촉식이었다면 이 두 방법은 표면과 직접 접촉하는 접촉식 프린팅 방법이다. 스크린 프린팅과 나노임프린팅은 점도가 높은 페이스트(paste) 형태의 나노입자가 패턴을 가지고 있는 인쇄판을 통해 대상물위에 인쇄되거나 몰드에 가해지는 압력에 의해 몰드의 형상을 가지도록 굳혀서 패턴을 만들게 된다. 현재 스크린 프린팅은 실리콘 태양전지의 집전체로 은나노입자 페이스트를 스크린 프린팅하는 공정에 산업적으로 많이 적용되고 있다. 하지만 스크린 프린팅으로 구현할 수 있는 정밀도는 수십 마이크로

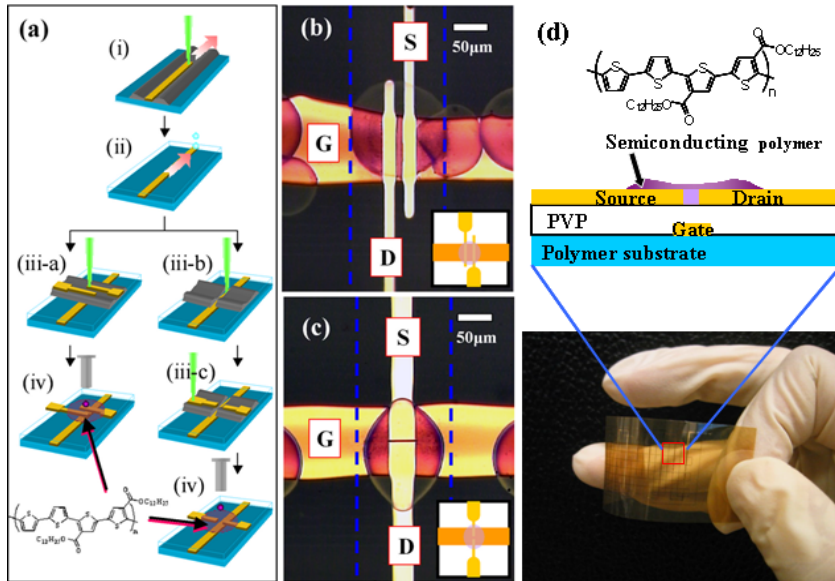


Figure 3. 레이저를 이용한 나노입자의 선택적 공정 (a) 공정, (b,c) 유기박막트랜지스터, (d) 유연 유기박막 트랜지스터 배열 [Ko *et al.* 2007c].

정도가 한계여서 직접 패터닝 방법중 가장 정밀도가 높은 나노임프린팅으로 새로운 연구가 최근 많이 시작되고 있다. 나노임프린팅은 Chow 연구실 (Chou *et al.* 1996)에 의해 처음 발표가 되었으며 수십 나노 수준의 고분자 패턴을 구현하였다. 그 이후 대부분의 나노임프린팅은 공정의 한계상 낮은 온도에서도 쉽게 변형되는 플라스틱 위주로 개발이 되었다. 금속물질의 직접 나노임프린팅은 벌크금속의 높은 용융점 때문에 나노임프린팅에는 직접적으로 이용되지는 못했었다. 그러나 최근에 Grigoropoulos

연구실(Ko *et al.* 2007b)에 의해 금속 나노입자를 상온에서 잉크상태로 만든후 그 나노잉크를 나노임프린팅한후에 낮은온도에서 다시 전도성 금속으로 용융시키는 방법을 통해 수십 나노수준의 금속 패턴을 플라스틱 기판위에 구현 할 수 있었다.

다음으로 소개할 나노입자 패터닝 방법은 Laser Induced Forward Transfer(LIFT)이다. 이 방법은 앞에 소개한 잉크젯 프린팅, 스크린프린팅, 나노임프린팅 방법이 wet한 방법이었다면 LIFT는 dry한 상태에서 나노파티클을 패터닝 할 수 있는 방법이다. LIFT는

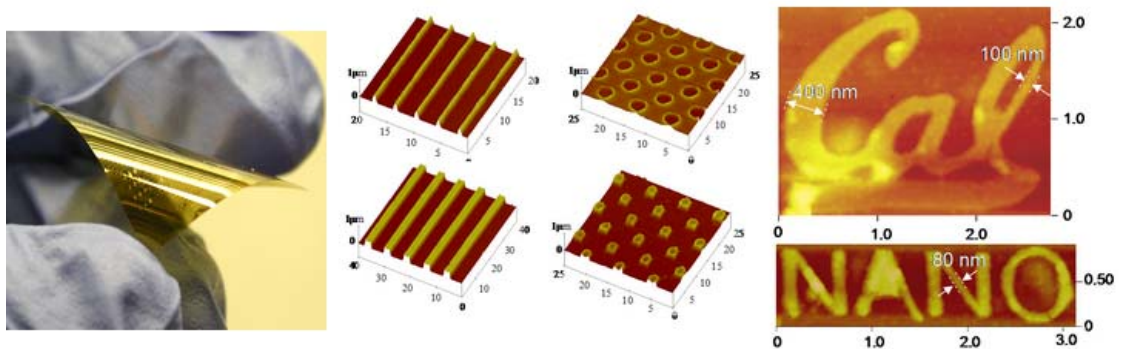


Figure 4. 금속 나노입자의 직접 나노임프린팅을 이용해 플라스틱 기판위에 형성된 금속 나노/마이크로 패턴 (Ko *et al.* 2007b).

Naval Research Lab의 Piqué 그룹(Piqué *et al.*, 1999)에 의해 주로 연구가 되었으며 다양한 유기물, 무기물, 셀 등을 패터닝하고 전달하는 용도로 이용되어 왔다. 카이스트 응용나노공학연구소(Ko *et al.* 2008)은 나노입자를 박막형태로 유기기판위에 만든 donor에 532nm파장의 나노초 레이저를 조사하여 넓은 면적 또는 수 마이크로크기의 작은 패턴 형태로 플라스틱 기판위에 패터닝 하는 방법을 제안하였다. 그 방법을 통하여 나노입자뿐만 아니라 나노입자위에 유기발광 물질을 증착하여 유기발광소자/금속나노입자 층을 한꺼번에 패터닝해서 플라스틱 기판위에 전달하는 공정을 구현하였다. 본 공정을 통해 나노입자를 굉장히 작은 레이저 에너지를 이용하여 패터닝이 가능하게 되었고 비접촉 방식으로 얻을 수 있는 최고의 패턴 정밀도를 얻을 수 있었다(Figure 5).

마지막으로 소개할 나노입자 패터닝 방법은 에어로젯(aerojet) 성막법이다. 에어로젯은 나노입자를 운반 기체(carrier gas)에 균일하게 분산 시킨후에 공기역학적으로 집속을 시켜서 일정 부분에 나노입자를 성막하는 비접촉식 패터닝 방법이다. 에어로젯 방법은 용매의 점도에 민감한 잉크젯 프린팅이나 스크린 프린팅과 달리 다양한 물질에 대해 쉽게 공정을 개발할 수 있고 대면적에 대해 빠른 속도로 공정을 할수 있는 장점이 있다. 하지만 잉크젯 프린팅이나 스크린 프린팅에 비해 패턴 경계면이 분명하지 않은 단점이 있다. Pan *et al.* (Pan *et al.* 2009)은 TiO₂

나노입자를 에어로젯 성막법을 이용하여 플라스틱 기판위에 적층후에 248nm 파장의 엑시머 나노초 레이저를 이용하여 플라스틱 기판이 손상되지 않고 TiO₂ 나노입자만 녹여서 나노 다공성 박막을 만들어서 유연기판위에 염료감응형 태양전지(dye sensitized solar cell)을 구현하였다. 기존의 염료감응형 태양전지는 400 °C에서 약 1시간 가량 열처리를 거쳐서 구현이 되었기 때문에 플라스틱을 기판으로 적용하는 것이 거의 불가능하였다. 그런데 UV 레이저와 에어로젯을 이용하게 되면 플라스틱 기판에 손상을 최소화하면서 최적의 나노다공성 산화금속 박막을 만들 수 있다. 아래 Figure 6은 산화금속 입자의 에어로젯 성막법과 레이저 공정을 이용하여 만든 유연 염료감응형 태양전지를 보여준다.

3. 결론 및 전망

금속 나노 입자를 이용한 다양한 저온 금속 패터닝 공정들과 그 공정을 이용하여 플라스틱 기판위에 전기소자를 구현하는 다양한 연구 동향에 대해 알아보았다. 나노입자를 이용한 다양한 직접 패터닝 방법들은 현재 전기소자의 생산에 주로 이용되고 있는 IC공정의 서론에서 언급한 다양한 문제점들을 해결할 수 있는 대안으로 떠오르고 있다. 대표적인 직접 프린팅, 패터닝 방법으로 쓰이는 잉크젯 프린

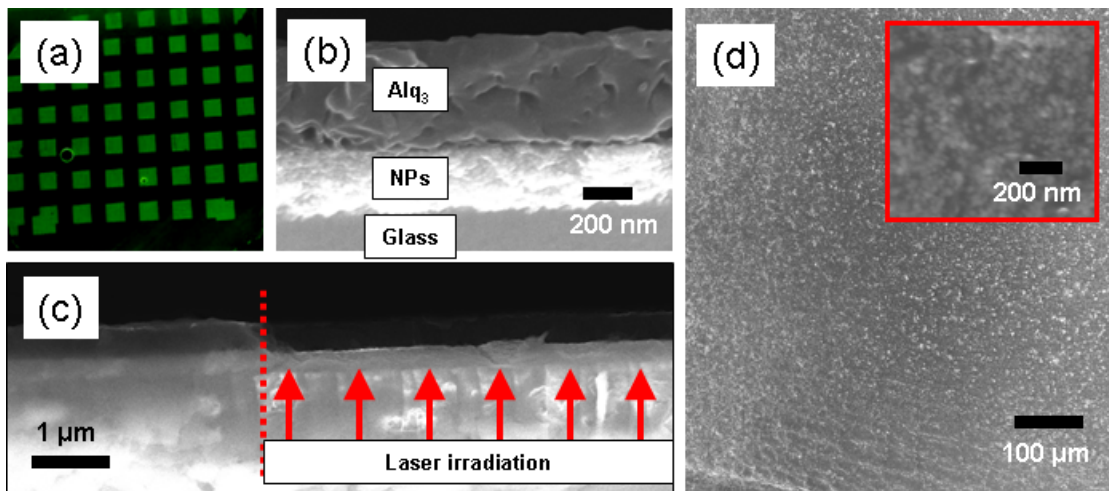


Figure 5. 나노입자 LIFT공정. (a)유기발광소자, (b,c) donor, (d) 공정후 전달된 나노입자 박막(Ko *et al.* 2008).

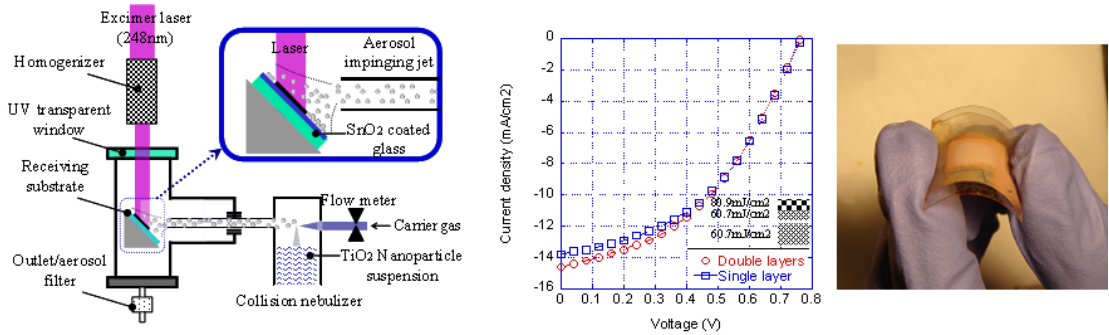


Figure 6. 나노입자 에어로젯 성막법을 이용한 유연 기판위 염료감응형 태양전지 구현(Pan *et al.* 2009).

팅과 나노임프린팅방법은 모두 대상물질이 공정 중에 어느 정도의 낮은 점도와 유동성을 가지고 있어야 하는 기본 요건이 있다. 하지만 금속을 유동성있게 만들려면 녹는점이상으로 가열을 해야하고 보통 금속의 녹는점은 굉장히 높아서 금속 패터닝을 위해 잉크젯 프린팅과 나노임프린팅기술이 이용되기 어렵고 비록 두 기술을 이용할 수 있다고 하더라도 용융된 금속의 높은 온도 때문에 플라스틱 기판이 열적으로 손상되기 쉽다. 하지만 금속을 작은 크기의 나노입자로 만들면 벌크에서는 볼 수 없었던 다양한 유용한 특성들을 나타내게되고 그런 새로운 성질을 이용하여 저온의 액상 공정을 개발할 수 있다. 우선 나노입자를 유기용매에 분산시키면 금속의 녹는점까지 공정 온도를 올리지 않고도 낮은 점도의 유동성을 얻을 수 있어서 잉크젯 프린팅과 나노임프린팅이 가능하게 되며 패터닝된 나노입자는 가열을 통해 다시 벌크 금속이 되는데 열역학적 크기 효과(thermodynamic size effect) 때문에 나노입자의 녹는점이 급격히 낮아지는 크기에 따른 용융점 강화(size dependent melting temperature depression)현상으로 플라스틱이 손상되지 않는 저온의 금속 패터닝 공정이 개발되고 있다.

나노입자를 기반으로 한 전자소자의 직접 패터닝 방법은 현재 유연 소자를 시작으로 점점 적용분야를 넓히고 있다. 현재 기술로는 양산체제에 적용되기에는 무리이고 기존 IC공정의 일부분을 대체하거나 채속공정(rapid prototyping)과 같이 대량생산체제에 최적화된 기존 공정에서는 구현하기 어려운 공정을 수행하는 수준에 있다. 하지만 최근 빠른 기술의 발달로 나노물질의 경제적인 대량생산이 가능해

지며 Roll-to-roll 공정과 같이 대량생산체제에 최적화된 직접 패터닝 공정들의 기술적인 문제들이 해결되면서 나노입자를 기반으로 한 전자소자개발 공정이 실제 양산공정에 조만간 적용될 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 산업기술연구회 협동연구사업(B551179-10-01-00), 한국지식경제부 산업원천기술개발사업(10032145), 한국연구재단 일반연구자사업 신진연구(2010-0003973)의 연구비 지원으로 수행 되었습니다.

참고 문헌

Buffat, P.A., Borel, J.P. (1976). Size effect on the melting temperature of gold particles, *Phys. Rev. A* 13(6) 2287-2298.

Chou, S.Y., Krauss, P.R., Renstrom, P.J. (1996) Imprint Lithography with 25-Nanometer Resolution, *Science* 272, 85-87.

Hostetler, M.J., Wingate, J.E., Zhong, C.J., Harris, H.E., Vachet, R.W., Clark, M.R., Nondono, J.D., Green, S.J., Stokes, J.J., Wignall, G.D., Glish, G.L., Porter, M.D., Evans, N.D., Murray, R.W. (1998). Alkanethiolate Gold Cluster Molecules with Core Diameters from 1.5 to 5.2 nm: Core and Monolayer Properties as a Function of

- Core Size, *Langmuir* 14 (1), 17-30.
- Ko, S.H., Chung, J., Pan, H., Grigoropoulos, C.P., Poulidakos, D. (2007a). Fabrication of multi-layer passive and active electric components on polymer using inkjet printing and low temperature laser processing, *Sensors and Actuators A* 134, 161-168.
- Ko, S.H., Park, I., Pan, H., Grigoropoulos, C.P., Pisano, A.P., Luscombe, C.K., Fréchet, J.M.J. (2007b). Direct Nanoimprinting of Metal Nanoparticles for Nanoscale Electronics Fabrication, *Nano Letters* 7(7), 1869-1877.
- Ko, S.H., Pan, H., Grigoropoulos, C.P., Luscombe, C.K., Fréchet, J.M.J., Poulidakos, D., (2007c). All inkjet printed flexible electronics fabrication on a polymer substrate by low temperature high resolution selective laser sintering of metal nanoparticles, *Nanotechnology* 18, 345202.
- Ko, S.H., Pan, H., Ryu, S.G., Misra, N., Grigoropoulos, C.P., Park, H.K. (2008) Nanomaterial Enabled Laser Transfer for Organic Light Emitting Material Direct Writing, *Applied Physics Letters* 93, 151110.
- Pan, H., Ko, S.H., Grigoropoulos, C.P., (2008). The Solid-State Neck Growth Mechanisms in Low Energy Laser Sintering of Gold Nanoparticles—A Molecular Dynamics Simulation Study, *Journal of Heat Transfer* 130, 092404.
- Pan, H., Ko, S.H., Misra, N., Grigoropoulos, C.P., (2009). Laser annealed composite TiO₂ electrodes for dye-sensitized solar cells on glass and plastics, *Applied Physics Letters* 94, 071117.
- Piqué, D.B., Chrisey, R.C.Y., Auyeung, J., Fitz-Gerald, H.D., Wu, R.A., McGill, S., Lakeou, P.K., Wu, V., Nguyen, Duignan, M., (1999). *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process.* 69, S279.
- Redinger, D., Molesa, S., Yin, S., Farschi, R., Subramanian, V., (2004) An inkjet deposited passive component process for RFID, *IEEE Trans. Electron Devices* 51 (12) 1978-1983.