

나노물질의 선택적 레이저소결을 이용한 유연전기소자 구현 연구현황[§]

고 승 환^{*†}

* 카이스트 기계항공공학부

Status of Research on Selective Laser Sintering of Nanomaterials for Flexible Electronics Fabrication

Seung Hwan Ko^{*†}

* Applied Nano Technology & Science Lab, Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, KAIST,

(Received December 13, 2010 ; Revised February 21, 2011 ; Accepted February 21, 2011)

Key Words: Selective Laser Sintering (선택적 레이저 소결), Flexible Electronics(유연전기소자), Nano Particles (나노입자), Low Temperature Process (저온공정), Maskless Process (마스크리스 공정)

초록: 대부분의 유연전기소자는 플라스틱, 옷감, 종이와 같이 고온에 민감한 물질이기 때문에 열에 민감한 기관 위에 금속을 증착하고 패터닝할 수 있는 저온 공정의 개발이 필요하다. 최근 기존의 광식각과 진공증착 방법을 이용하지 않고 액상으로 금속 나노입자의 박막을 형성하고 선택적 레이저 소결을 이용하여 플라스틱에 열적손상을 최소화하고 고해상도의 금속 패터닝을 방법이 많은 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 본 연구실에서 활발히 수행중인 나노물질의 선택적 레이저소결법을 이용하여 유연 디스플레이와 유연태양전지와 같은 유연전기소자의 개발 동향에 대해 알아보고 앞으로의 발전방향에 대해 논의한다.

Abstract: A plastic-compatible low-temperature metal deposition and patterning process is essential for the fabrication of flexible electronics because they are usually built on a heat-sensitive flexible substrate, for example plastic, fabric, paper, or metal foil. There is considerable interest in solution-processible metal nanoparticle ink deposition and patterning by selective laser sintering. It provides flexible electronics fabrication without the use of conventional photolithography or vacuum deposition techniques. We summarize our recent progress on the selective laser sintering of metals and metal oxide nanoparticles on a polymer substrate to realize flexible electronics such as flexible displays and flexible solar cells. Future research directions are also discussed.

1. 서 론

1.1 유연전기소자란?

전기소자 기관에 외력이 가해졌을 때 변형 가능한 기관은 스트레스를 받아 굽혀지거나 늘어나게 된다. 보통의 전기소자는 이러한 기계적 변형 하에서 정상적인 작동이 멈추게 되지만 유연전기소자(flexible electronics)는 이런 스트레스상에서도 작동할 수 있게 특수 디자인된 소자들이다. 대부분 구부릴 수 있는 플라스틱, 섬유, 종이등위에 만든

전기소자를 구현하며 대표적인 예로 구부릴 수 있는 모니터(flexible display), 입을 수 있는 컴퓨터(wearable computer) 등이 있다. 현재의 실리콘과 유리 기관 중심의 전자소자들은 특성상 구부릴 수 없고 공정자체가 실리콘과 같은 무기물질에 최적화가 되어 있기 때문에 주로 플라스틱을 기관으로 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 기관을 변형할 수 있기 때문에 차 유리나 헬멧과 같은 다양한 모양의 표면 위에 전기소자를 직접 부착할 수도 있고 기존의 무기재료전기소자기관에 비해 굉장히 가볍고, 박형화가 가능하며, 내구성이 커서 깨질 염려가 없

§ 이 논문은 대한기계학회 2010년도 추계학술대회(2010. 11. 3.-5., ICC 제주) 발표논문임

† Corresponding Author, maxko@kaist.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

는 장점들이 있기 때문에 휴대용전자기에 최적이다. 뿐만 아니라 유연전기소자가 더욱 무한한 가능성을 가지는 것은 경제적인 측면이라고 할 수 있다. 유연전기소자기판은 주로 플라스틱과 같은 유기물질이 사용되는데, 플라스틱은 실리콘, 유리 등의 재료에 비하면 비용이 비교가 안 될 정도로 저렴할 뿐만 아니라 기판의 대형화가 쉽다는 장점이 있다. 플라스틱은 대형화가 쉽고 무엇보다도 가장 궁극의 경제적인 공정형태인 Roll-to-Roll 공정(신문을 인쇄하듯이 두루마리처럼 말린 플라스틱 기판을 계속 공급하면서 그 위에 패턴을 연속적으로 만드는 공정)이 가능하다는 데 있다.

1.2 유연전기소자 연구동향

유연전기소자가 가지고 있는 다양한 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 것은 현재 전자 기기제조에 가장 많이 사용되고 있는 실리콘 위주의 IC(integrated circuit)공정이 유연전기소자를 제조하기 위한 공정에 적합하지 않다는 데 있다. 이런 문제점은 기존의 IC 공정이 안고 있는 고비용의 문제점을 피할 수 있는 좋은 기회이기도 하지만 새로운 공정을 개발해야 하는 부담이 되기도 한다. 기존의 무기물질 위주의 IC 공정은 다양한 고온공정들, 부식성이 강한 화학물질은 쓰는 에칭(etching)공정들을 이용하여서 플라스틱과 같은 유연전기소자기판에는 적합하지 않다. 그리고 비용 측면에서도 진공장비, 포토마스크(photomask), 화학약품 등의 천문학적인 비용의 장비가 필요할 뿐만 아니라 공정이 많은 시간과 노동을 필요로 하기 때문에 적합하지 않다. 그리고 99%이상의 재료가 낭비되며 공정 중 나온 물질들은 독성이 강

한 물질들이 대부분이기 때문에 환경적으로도 친화적이지 않다. 따라서 유연전기소자를 만들기 위한 새로운 공정을 개발하려면 위에서 언급한 기존의 IC 공정이 안고 있는 다양한 문제점들을 극복하는 새로운 기술이어야 한다.⁽¹⁻³⁾

현재 이러한 기존 공정들을 탈피하여 진공증착과 포토 리소그래피를 이용하지 않고 저온에서 플라스틱 기판위에 기능성 전기소자를 구현하는 나노물질용 바탕으로 한 직접 패터닝 전자인쇄공정(printed electronics) 공정들이 개발되고 있다. 현재 유연전기소자는 크게 다음의 두 가지 연구 주제; 1) 유연전기소자를 만들기 위한 새로운 방법으로 나노입자, 나노와이어, 반도체 폴리머와 같은 나노물질과 유기반도체 신소재를 이용한 소자재료공정 개발, 2) 기존의 실리콘위주의 리소그래피 공정을 쓰지 않는 직접 패터닝(direct patterning)공정 개발 등이 활발히 연구되고 있다. 이런 연구와 관련하여 본 연구실은 나노입자의 박막형성과 그의 레이저 저온 소결공정을 이용하는 새로운 고해상도 저온 금속 패터닝 공정을 개발하였고 다양한 응용분야에 성공적으로 적용하였다. 본 논문은 본 연구실에서 개발된 나노물질과 레이저 저온 소결을 이용한 다양한 인쇄전자공정의 유연전기소자로 적용에 대한 연구 동향에 대해 알아보고 앞으로의 방향에 대해 논의 한다.

2. 본 론

2.1 금속 나노입자의 선택적 레이저 공정을 이용한 저온 금속 박막 형성 및 고해상도 패터닝

기존의 IC(integrated circuit)공정은 고온공정들, 부식성이 강한 화학물질은 쓰는 에칭공정들을 이용하여서 플라스틱과 같은 유연전기소자기판에는 적합하지 않다. 뿐만아니라 기존의 IC 공정은 고가의 진공장비, 포토마스크, 화학약품을 쓰며 재료의

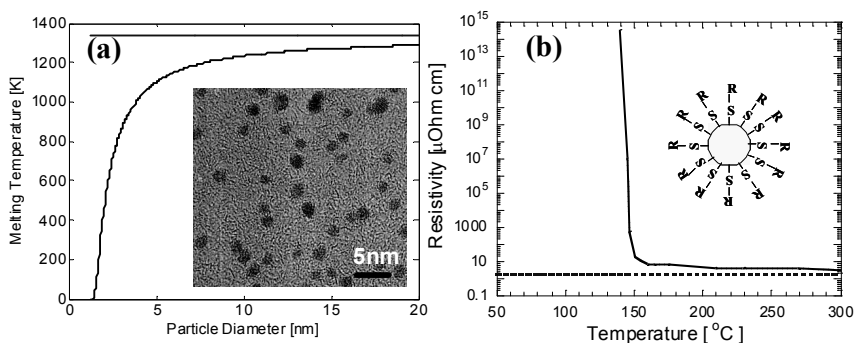


Fig. 1 Nanoparticle thermal and electrical characteristics. (a) Size dependent melting temperature drop. (b) Resistivity change after NP melting⁽⁴⁾

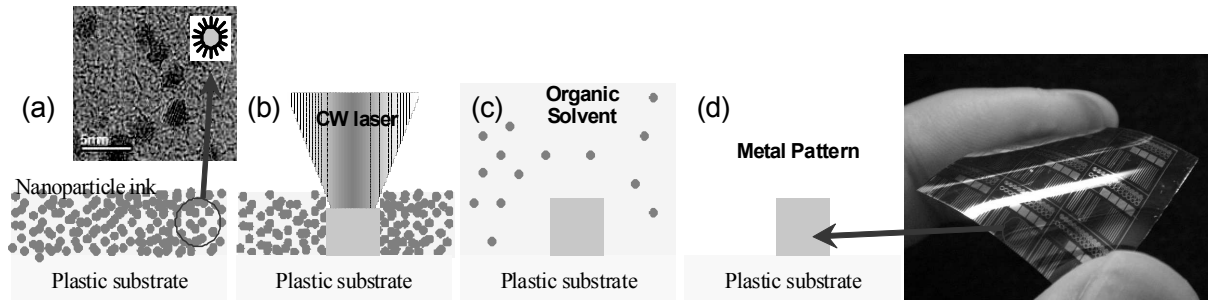


Fig. 2 Nanoparticle selective laser sintering process. (a) Nanoparticle deposition. (b) Selective laser sintering. (c) Wash out of non-sintered nanoparticles. (d) Metal patterning on a polymer substrate⁽⁶⁾

낭비가 굉장히 심하고 시간과 노동력이 많이 들기 때문에 저가의 플라스틱 기판을 쓰며 비용절감의 측면을 가지고 있는 유연전기소자의 장점을 무색하게 만든다. 따라서 유연전기소자를 만드는 신공정은 플라스틱이 견딜 수 있는 저온공정이면서 부식성강한 화학약품을 쓰는 공정이 없고 고가의 진공장비와 마스크를 쓰지 않는 직접패터닝(direct patterning) 기술이어야만 한다.^(2,3)

다양한 직접패터닝 기술이 존재하는데 플라스틱 기판위에 금속 전극을 패터닝하기위해 물질선택 및 공정상 가장 응용범위가 넓은 잉크젯 프린팅(inkjet printing)⁽³⁾방법과 가장 높은 해상도를 가지는 나노임프린팅(nanoimprinting)⁽⁴⁾방법이 주로 채택하여 연구되고 있다. 잉크젯 프린팅과 나노임프린팅방법은 모두 대상물질이 공정 중에 어느 정도의 낮은 점도와 유동성을 가지고 있어야하는 기본요건이 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 쉽게 손상되기 쉽다. 하지만 금속을 작은 크기의 나노입자로 만들면 벌크에서는 볼 수 없었던 다양한 유용한 특성들을 가지게되고 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 Fig. 1(a)에서 보이는 바와 같이 열역학적 크기효과(thermodynamic size effect) 때문에 나노입자의 녹는점이 급격히 낮아지는 size dependent melting temperature depression⁽⁵⁾현상으로 플라스틱이 손상

되지 않는 저온의 금속 패터닝 공정을 개발할 수 있다. 금속 나노입자는 낮은 온도에서 녹기 시작하며 녹기전에는 Fig. 1(b)의 그림처럼 유기물질로 코팅이 되어 있기 때문에 금속이라도 전기가 흐르지 않고 녹은 후에는 코팅은 없어지고 각각의 금속 입자들이 연결되어서 전기가 잘 흐르는 금속이 된다.

Fig. 2는 나노입자의 선택적 레이저 소결을 이용하여 플라스틱 기판 위에 고해상도 전기소자를 만드는 공정을 나타낸다. 우선 나노입자를 잉크젯 프린팅, 에어로젯 프린팅 등을 통해 플라스틱 기판위에 고르게 박막을 형성하고 나노물질이 잘 흡수하는 파장의 레이저를 조사하여 부분적으로 나노물질을 녹여서 연속적으로 연결된 금속 패턴을 만들게 된다. 여기서 레이저가 지나간 부분만 나노물질이 녹아서 금속 패턴을 만들게 되고 나머지 부분은 유기용매에 쉽게 다시 녹아서 깨끗하게 제거할 수 있다. 레이저를 이용하여 선택적으로 나노물질을 소결하는 공정은 기존의 잉크젯프린팅과 핫플레이트를 통해 얻는 해상도(20~50 μm)에 비해 해상도를 sub-micron 까지 현저히 증가 시킬 수 있으며 시간도 단축할 수 있고 coffee stain 문제와 같은 비균일한 박막형성 문제를 해결할 수 있는 등등의 다양한 장점을 가지고 있다.^(6,7) 뿐만 아니라 펄스형태의 레이저를 조사하면 열확산을 줄여서 기판의 열적손상을 최소화 할 수 있고 레이저의 파장을 특정 나노물질만 잘 흡수하게 조절하여 물질간의 선택적 또는 깊이 방향으로의 선택적 가공이 가능하게 된다. Fig. 3은 본 공정을 통해 구현된 유기박막 트랜지스터(OFET)의 배열을 보여준다. 유기박막 트랜지스터는 나노입자의 선택적 레이저소결을 이용해서 구현된 고해상도 전극과 투명 유기 절연체(PVP), 보라빛의 유기 반도체로 구성되며 $10^3\text{-}10^4$ 의 Ion/Ioff 비와 $0.002\text{ cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}^{-1}$ 의 hole mobility의 유기 트랜지스터 특성을 나타낸다.⁽⁷⁾

2.2 나노입자의 선택적 레이저전사를 이용한 유기발광소자 패터닝

유연디스플레이를 완성하기 위해서는 박막 트랜지스터와 연결될 빛을 내는 발광소자를 완성하고 그 둘을 통합해야 한다. 폴리머 유기 발광물질은 유기용매에 잘 녹아서 잉크젯 프린팅이나 나노임프린팅을 통해 패터닝을 할 수 있다. 하지만 모노머는 유기용매에 잘 안 녹아서 새도우 마스크를 이용해 증착을 해야하는 단점이 있지만 폴리머에 비해 조도가 훨씬 높다. 하지만 모노머증착 패터닝은 여러가지 문제점이 있어서 레이저를 이용해 패터닝과 트랜스퍼를 하는 방법이 활발히 연구가 되고 있다. 이 방법은 유기 발광물질 박막을 유리위에 만든 뒤 부분적으로 유기발광물질이 잘 흡수하는 적외선이나 자외선 레이저를 조사하여 유기 발광물질의 일부분이 용융/기화되면서 기판위에 패턴이 전사된다. 따라서 열에 취약한 유기발광물질 일부분은 조사된 레이저에 의해 변질되는 단점이 있다. 이런 기존공정의 한계를 극복하기 위해 유기발광물질과 유리사이에 나노물질을 주입하여 레이저 패터닝을 좀더 적은 에너지

에서 효율적으로 수행할 수 있는 방법이 제안되었다. 나노물질은 광학적 특성에 따라 특정 파장을 잘 흡수 할 수 있게 합성할 수 있는데 공정에 쓰이는 광 에너지의 파장이 나노물질에만 잘 흡수되고 유기물질에는 잘 흡수되지 않는 파장을 선택하여 유기물질은 열변형을 최소화할 수 있다. 그리고 나노물질은 벌크물질에 비해 입자 서로간의 결합력 작아 벌크물질을 가공할때보다 훨씬 낮아서 작은 레이저 에너지로도 전사공정을 수행 할 수 있게 된다. 본 공정은 유기발광물질뿐만 아니라 열에 약한 다양한 유기물질과 액체상태로 만들기 어려워서 잉크젯 프린팅이나 나노임프린팅을 하기 어려운 물질의 패터닝에 널리 이용될 수 있다. Fig. 4는 나노물질을 이용한 녹색 계열의 유기발광물질인 Alq3 를 전사하는 공정으로 532nm 의 Nd:YAG 레이저를 조사하여 수 마이크로의 고해상도 패터닝을 수행하였다.⁽⁸⁾

2.3 산화금속 나노입자의 저온 소결을 이용한 유연 태양전지 개발

나노물질은 표면/체적비가 굉장히 커서 다양한

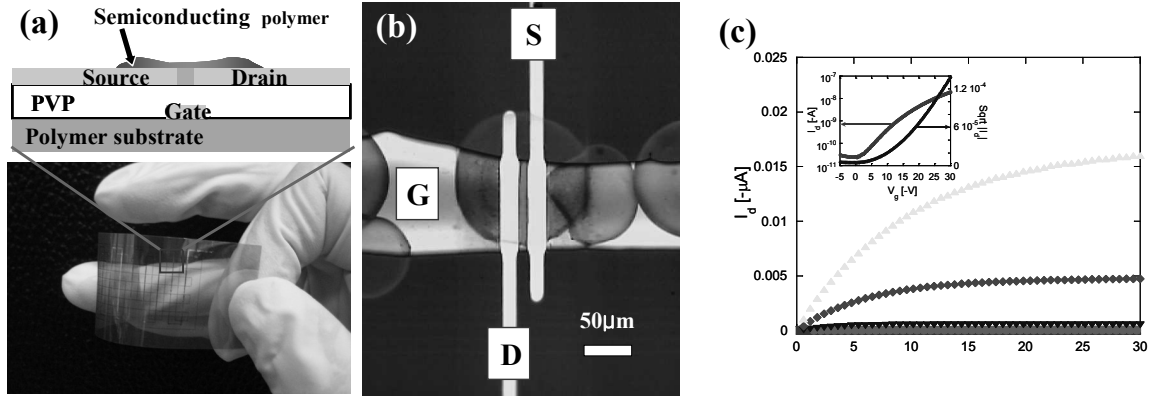


Fig. 3 Organic field effect transistors fabricated on a plastic substrate by selective laser sintering of inkjet printed NPs (a) Schematics and micrograph of OFET array. (b) Magnified image of a OFET. (c) Transfer and output characteristics of a fabricated OFET⁽⁷⁾

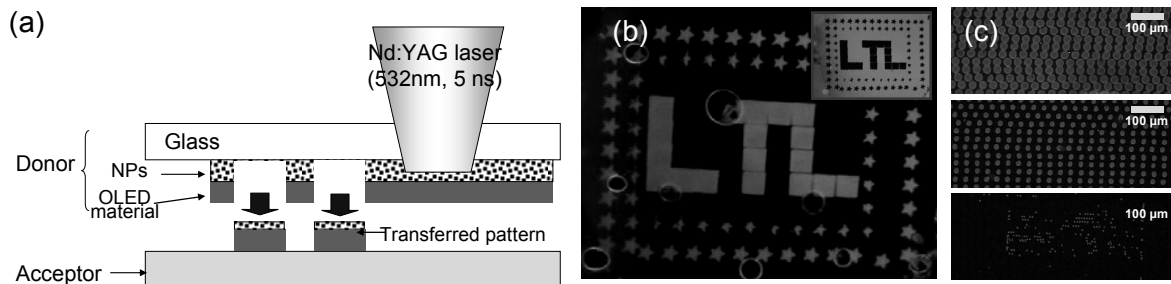


Fig. 4 OLED pixel transfer by nanomaterial enabled laser transfer. (a) Process schematics. Photoluminescence image of transferred Alq3 patter by (b) homogenized laser beam and (c) focused Gaussian beam⁽⁸⁾

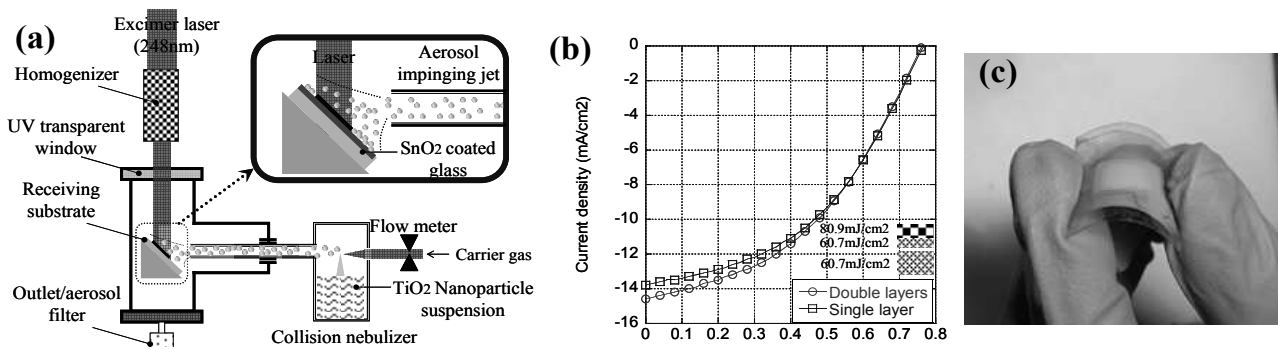


Fig. 5 Flexible dye sensitized solar cell fabrication. (a) TiO₂ nanoparticle aerosol jet deposition & UV laser sintering system. (b) IV curve of laser processed DSSC. (c) Digital picture of flexible DSSC⁽⁹⁾

새로운 성질을 나타낸다. 이런 넓은 표면적을 이용하여 화학적 촉매반응 등에 적용되기도 한다. 넓은 표면적이 유용하게 쓰이는 분야에는 태양전지(solar cell)도 있다. 태양빛을 받는 표면적이 넓을 수록 태양전지의 효율이 더욱 커지게 된다. 나노입자를 이용하는 대표적인 태양전지는 염료감응형 태양전지 (Dye sensitized solar cell)로 일반적으로 TiO₂ 나노입자를 박막형태로 만든 후 350~450°C의 고온에서 30 분이상 소결하여 나노 다공성 구조체를 만들고 염료와 전해질을 침투시켜 완성한다. 그런데 공정이 플라스틱이 견디기 어려운 고온 공정이기 때문에 염료감응형 태양전지를 플라스틱 기판위에 구현하는 것은 거의 불가능한 공정이였다. 하지만 레이저 소결을 이용하게 되면 앞에서 언급한 플라스틱이 열손상되지 않는 저온 공정을 개발할 수 있기 때문에 고효율 염료감응형 태양전지를 플라스틱 기판위에 구현할 수 있게 되었다. TiO₂ 나노입자를 운반기체(carrier gas)에 균일하게 분산 시킨 후에 공기역학적으로 집속을 시켜서 일정 부분에 나노입자를 성막하는 비접촉식 패터닝 방법인 에어로젯 방법으로 나노입자 박막을 완성하였다. 에어로젯 방법은 용매의 점도에 민감한 잉크젯 프린팅이나 스크린 프린팅과 달리 다양한 물질에 대해 쉽게 공정을 개발할 수 있고 대면적에 대해 빠른 속도로 공정을 할 수 있는 장점이 있다. 하지만 잉크젯 프린팅이나 스크린 프린팅에 비해 패턴 경계면이 분명하지 않은 단점이 있다. 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 태양전지를 구현하였다.⁽⁹⁾ UV 레이저와 에어로젯을 이용하게 되면 플라스틱 기판에 손상을 최소화하면서 최적의 나노다공성 산화금속 박막을 만들 수 있다.

아래 Fig. 5 는 산화금속 입자의 에어로젯 성막법과 레이저 공정을 이용하여 만든 유연 염료감응형 태양전지를 나타내고 있다. 본 공정을 통해 제작된 염료감응형 태양전지의 효율은 약 3.3%를 나타내었으며 기존 공정에 의해 만들어진 태양전지의 효율 (~3.0%)에 비해 향상됨을 보여주었다.

3. 결론

유연전기소자를 구현하기 위해 기존의 광식각 및 진공증착을 이용하지 않고 나노물질과 그의 레이저 저온 소결 공정을 이용하는 새로운 공정이 개발되었다. 유연전기소자중 특히 유연 디스플레이와 유연 태양전지에 적용하기 위해 개발된 나노입자의 저온 레이저 공정에 대한 동향에 대해 알아보았다. 첫번째로, 금속 나노 입자를 이용한 다양한 저온 금속 패터닝 공정들과 그 공정을 이용하여 플라스틱 기판위에 전기소자를 구현하는 다양한 연구, 두번째로 열에 민감한 유기발광물질의 패터닝과 전사 방법에 관한 연구, 세번째로 산화금속 나노입자를 이용하여 플라스틱 기판위에 다공성 나노구조체를 만들어서 고효율 염료감응형 태양전지를 만드는 연구의 동향에 대해 알아보았다. 나노입자를 이용한 다양한 직접 패터닝 방법들은 현재 전기소자의 생산에 주로 이용되고 있는 IC 공정의 서론에서 언급한 다양한 문제점들을 해결할 수 있는 대안으로 떠오르고 있다. 대표적인 직접 프린팅, 패터닝 방법으로 쓰이는 잉크젯 프린팅과 나노임프린팅방법은 모두 대상물질이 공정 중에 어느 정도의 낮은 점도와 유동성을 가지고 있어야하는 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 있다

고 하더라도 용융된 금속의 높은 온도 때문에 플라스틱 기판이 열적으로 손상되기 쉽다. 하지만 금속을 작은 크기의 나노입자로 만들면 벌크에서는 볼 수 없었던 다양한 유용한 특성들을 나타내게 되고 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 크기효과(thermodynamic size effect) 때문에 나노입자의 녹는점이 급격히 낮아지는 크기에 따른 용융점 강하(size dependent melting temperature depression)현상으로 플라스틱이 손상되지 않는 저온의 금속 패터닝공정이 개발되고 있다.

나노입자를 기반으로 한 전자소자의 직접 패터닝 방법은 현재 유연 소자를 시작으로 점점 적용 분야를 넓히고 있다. 현재 기술로는 양산체제에 적용되기에는 무리이고 기존 IC 공정의 일부분을 대체하거나 쾌속공정(rapid prototyping)과 같이 대량생산체제에 최적화된 기존 공정에서는 구현하기 어려운 공정을 수행하는 수준에 있다. 하지만 최근 빠른 기술의 발달로 나노물질의 경제적인 대량생산이 가능해지며 Roll-to-roll 공정과 같이 대량생산체제에 최적화된 직접 패터닝 공정들의 기술적인 문제들이 해결되면서 나노입자를 기반으로 한 전자소자개발 공정이 실제 양산공정에 조만간 적용될 것으로 예상된다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Ko, S.H., 2010, "Research Status on Flexible Electronics Fabrication by Metal Nano-particle Printing Processes," *Particle and Aerosol Research*, Vol. 6, No. 3, pp131~138.
- (2) Redinger, D., Moles, S., Yin, S., Farschi, R. and Subramanian, V., 2004, "An Inkjet Deposited Passive Component Process for RFID," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 51, No. 12, pp.1978~1983.
- (3) Ko, S.H., Chung, J., Pan, H., Grigoropoulos, C.P. and Poulikakos, D., 2007, "Fabrication of Multilayer Passive and Active Electric Components on Polymer Using Inkjet Printing and Low Temperature Laser Processing," *Sensors and Actuators A*, 134, pp.161~168.
- (4) Ko, S.H., Park, I., Pan, H., Grigoropoulos, C.P., Pisano, A.P., Luscombe, C.K. and Fréchet, J.M.J., 2007, "Direct Nanoimprinting of Metal Nanoparticles for Nanoscale Electronics Fabrication," *Nano Letters*, Vol. 7, No. 7, pp.1869~1877.
- (5) Buffat, P.A. and Borel, J.P., 1976, "Size Effect on the Melting Temperature of Gold Particles," *Phys. Rev. A*, Vol. 13, No. 6, pp.2287~2298.
- (6) Ko, S.H., Pan, H., Lee, D., Grigoropoulos, C.P. and Park, H.K., 2010, "Nanoparticle Selective Laser Processing for a Flexible Display Fabrication," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 49, 05EC03.
- (7) Ko, S.H., Pan, H., Grigoropoulos, C.P., Luscombe, C.K., Fréchet, J.M.J. and Poulikakos, D., 2007, "All Inkjet Printed Flexible Electronics Fabrication on a Polymer Substrate by Low Temperature High Resolution Selective Laser Sintering of Metal Nanoparticles," *Nanotechnology*, 18, 345202.
- (8) Ko, S.H., Pan, H., Ryu, S.G., Misra, N., Grigoropoulos, C.P. and Park, H.K., 2008, "Nanomaterial Enabled Laser Transfer for Organic Light Emitting Material Direct Writing," *Applied Physics Letters* 93, 151110.
- (9) Pan, H., Ko, S.H., Misra, N. and Grigoropoulos, C.P., 2009, "Laser Annealed Composite TiO₂ Electrodes for Dye-Sensitized Solar Cells on Glass and Plastics," *Applied Physics Letters*, 94, 071117.