

REVIEW

선택적 레이저 소결을 이용한 유연인쇄전자소자 제작

윤상진^{1†}, 민진기^{1†}, 고승환^{1,2*}

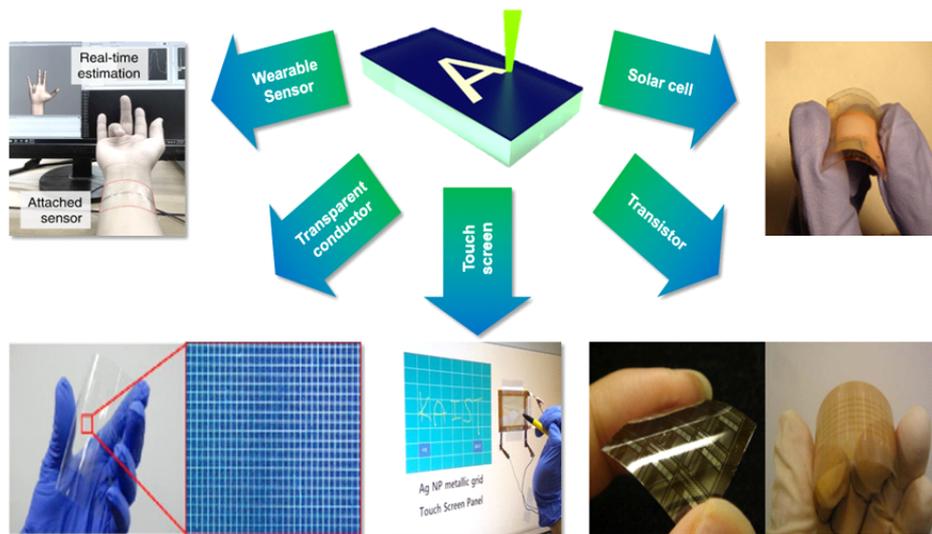
¹서울대학교 기계공학부 응용나노 및 열공학 연구실, ²서울대학교 정밀기계공동연구소

Fabrication of Flexible Printed Electronic Using Selective Laser Sintering

Sang J. Yoon^{1†}, JinKi Min^{1†}, Seung Hwan Ko^{1,2*}

¹Applied Nano and Thermal Science Lab, Mechanical Engineering Department, Seoul National University, Seoul, Korea

²Institute of Advanced Machines and Design, Seoul National University, Seoul, Korea



ABSTRACT

It is necessary to develop a low temperature process that can deposit and pattern metal on a heat sensitive substrate because most flexible printed electronics use high temperature sensitive materials such as plastic. The most commonly used photolithography process is not suitable for flexible printed electronics because the high temperature thermal treatment process and chemicals are not compatible with plastic. Recently research has been actively conducted on a method of minimizing thermal damage to plastic and high-resolution metal patterning by using selective laser sintering after forming a liquid metal nanoparticle thin film without using existing photolithography and vacuum deposition. In this review paper, we explore flexible printed electronics such as flexible thin film transistors and flexible transparent conductors using selective laser sintering of nanomaterials and discuss future development directions.

Key Words: Nanoparticle, Selective laser sintering, Self-assembled monolayer, Photolithography, Thermodynamic size effect

*Correspondence: maxko@snu.ac.kr

[†]These authors contributed equally to this work.



1. 서론

인쇄 전자소자(printed electronics)는 인쇄 기술을 응용하여 전자 회로나 장치를 제조하는 것을 의미한다 [1]. 기존의 공법들은 주로 포토리소그래피, 진공증착과 같이 다단계이며 고비용의 장비를 필요로 하고 환경적으로 바람직하지 않은 화학 물질을 사용했다. 반면에 인쇄 전자소자는 기존 생산 방식에 비해 빠르고 저비용이며 친환경적인 제조 기술이다. 현재 프린팅 기계에 사용되는 잉크는 전도성(conductive), 유전체(dielectric), 반도체(semi-conductive), 자성(magnetic)의 성질을 가지고 있다. 인쇄 전자소자는 유기 전자소자(organic electronics), 종이 전자소자(paper electronics), 유연 전자소자(flexible electronics), 플라스틱 전자소자(plastic electronics)와 같은 다양한 분야와 관련이 있다[2]. 이는 실리콘이나 유리나 같은 기존의 강성 기판(rigid substrate)이 아닌 플라스틱이나 종이와 같은 유연한 기판에도 회로를 인쇄할 수 있음을 보여준다[3].

유연 전자소자(flexible electronics)는 유기(organic) 또는 무기(inorganic) 전자 장치를 유연 기판(flexible substrate)에 증착하여 회로를 형성하는 것을 의미한다 [4]. 차세대 전자 장치들은 휴대성 및 내구성을 높이기 위해 유연한 형태(flexible form)를 가지게 될 것이다. 강성 기판을 사용할 경우 전자 부품들을 손상으로부터 보호할 수 있지만 전자 부품의 유연성(flexibility)과 연성(ductility)에 한계를 가져온다. 기존의 강성 마이크로 전자장치들과 비교했을 때 유연 전자소자의 가장 큰 특징은 유연성이다. 이 특징으로 인해 유연 전자소자는 신축성(stretchable)을 가지고 있고, 휴대가 가능하며(portable), 웨어러블(wearable)하고 인쇄 전자소자로서 빠르게 응용 가능하다.

유연 인쇄 전자소자(flexible printed electronics)는 다양한 기능성 잉크나 코팅 등을 통해 전자 장치를 만

드는 기술로 유연 전자소자와 인쇄 전자소자의 특징이 결합되어 있다. 이러한 방식을 통해 유연 전자 소자를 빠르고 대량으로 생산할 수 있다. 이러한 장점으로 인해 장치의 생산 비용을 절감할 수 있다는 점에서 많은 관심을 받고 있다. 하지만 현재 전자 장치의 생산에 가장 많이 사용되는 진공 증착이나 포토리소그래피 등 실리콘과 같은 강성 기판 위주의 공정은 유연 전자소자 기판에 적합하지 않다. 또한 인쇄나 코팅을 통해 형성된 패턴들이 전기적 성질을 갖게 하기 위해서는 고온 열처리 과정이 필요한데, 이는 플라스틱과 같은 유연 전자소자 기판에 적합하지 않다[5].

포토리소그래피는 기판 위에 빛을 이용하여 사진 기술을 써서 회로를 형성하는 방법으로 현재 전자 장치 생산에서 가장 많이 사용되는 공정이다. 일반적으로 포토리소그래피 공정의 순서는 Fig. 1과 같다. 우선 스핀코팅(spin coating) 등의 방법을 통해 포토레지스트(photoresist)를 반도체 웨이퍼(wafer) 위에 도포한 뒤 포토마스크(photomask)를 위치시키고, 빛을 가해 포토

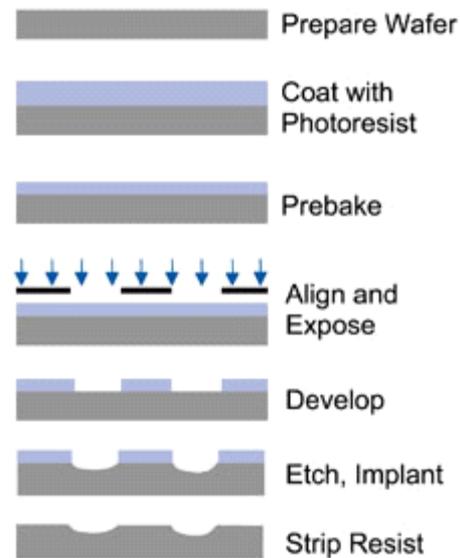


Fig. 1. Typical sequence of photolithography processing steps.



레지스트를 빛에 부분 노출시킨다. 빛을 받아 화학적 변화가 발생한 포토레지스트 부분을 현상액(developer)이라는 특별한 용액으로 제거한 뒤 에칭(etching)과 포토레지스트 제거 과정을 거친다. 에칭이란 액체나 플라즈마(plasma)를 이용하여 포토레지스트에 의해 보호받지 못하는 영역을 제거하는 과정이다. 에칭 이후에는 포토레지스트가 더이상 필요하지 않기 때문에 기판에서 제거한다[6].

현재 포토리소그래피 공정은 다른 공정들과 비교했을 때 성능이나 신뢰성 등에서 우수하다는 장점을 가진다. 하지만 포토리소그래피 공정은 실리콘이나 유리와 같은 물질에 최적화 되어 있기 때문에 기존의 강성 기판에만 적용이 적합하다. 현재의 포토리소그래피 공정은 여러 고온 공정 과정을 거치고 에칭과 같은 부식성이 강한 화학물질을 사용하기 때문에 플라스틱 등의 물질이 사용되는 유연 인쇄 전자소자 기판에는 적절하지 않다. 또한 포토레지스트 공정은 진공장비나 포토마스크 등의 고비용 장비들을 필요로 한다. 그리고 공정 과정에서 대부분의 물질은 버려지는 점에서 낭비되는 비용도 많다. 따라서 유연 인쇄 전자소자를 생산하기 위해서는 위에서 언급한 공정이 가지고 있는 문제점을 해결한 새로운 공정의 개발이 필요하다[7].

현재 포토리소그래피를 사용하지 않고 유연 인쇄 전자소자를 생산하기 위해 저온에서 플라스틱 기판 위에 직접 패터닝을 하는 공정들이 개발되고 있다. 그 중에 잉크젯 프린팅(inkjet printing) 공정이 많이 연구되고 있다. 잉크젯 프린팅의 경우, 사용되는 물질이 유동성을 가지고 있어야 한다. 하지만 대부분의 금속의 경우 녹는점이 높아서 플라스틱 기판 위에 패터닝을 할 경우 기판이 손상될 수 있다는 문제점을 가진다. 하지만 금속을 나노 입자로 만들게 되는 경우 벌크의 경우보다 녹는점이 열역학적 크기 효과(thermodynamic size effect)로 인해 낮아지게 된다. 이를 이용하여 플라스틱 기판이 손상되지 않는 저온에서 금속을 패터닝할 수

있는 공정을 개발할 수 있다. 금속 나노 입자를 유기용매에 분산시키면 유동성이 있는 입자를 얻을 수 있어서 잉크젯 프린팅이 가능하게 된다. 프린팅이 된 금속 입자들은 유기물로 코팅이 되어 있기 때문에 전기가 흐르지 않는다. 하지만 입자들이 녹은 후에는 코팅된 유기물질들이 사라지게 되고 금속 입자들이 연결되어 전기가 흐르게 된다. 이 방법을 이용하여 유기용매에 섞인 금속 입자들을 잉크젯 프린팅을 통해 플라스틱 기판 위에 고르게 박막을 형성할 수 있다. 이후 금속 나노 입자에 레이저를 조사하여 나노 입자들을 녹여서 연속적인 금속 패턴을 만들 수 있다[8]. 녹지 않은 나노물질들은 유기용매를 이용하여 제거할 수 있다. 레이저를 이용하여 금속 나노 물질을 소결하는 공정은 기존의 잉크젯 프린팅 공정에 비해 더 높은 해상도를 얻을 수 있으며 시간을 단축할 수 있다. 또한 나노 물질은 특정 파장을 잘 흡수하고 벌크에 비해 입자 간의 결합력이 작기 때문에, 더 적은 에너지를 가진 레이저를 통해 공정을 수행할 수 있다[9].

따라서 본 논문에서는 저온의 레이저 공정을 활용한 유연 인쇄 전자소자의 생산 과정 및 레이저 공정의 유용성에 대해 살펴봄으로써 포토리소그래피 대체 공정의 가능성을 제시하고자 한다.

2. 선택적 레이저 소결

기존 포토리소그래피 공정의 한계를 극복하기 위해 유연 박막 트랜지스터나 유연 태양 전지와 같은 유연 전자소자 생산에서 다양한 나노 입자의 선택적 레이저 소결 공정이 연구되었다. 나노 입자는 일반적으로 기계적, 광학적, 전기적, 열적 그리고 자기적 특성이 벌크 물질의 물리적 특성과 크게 다르게 나타나기도 한다[10]. 나노 입자의 표면에 위치한 원자들의 에너지는 내부의 원자들의 에너지와 크게 다르다. 입자들의 작은 곡률 반경 및 유한한 입자의 크기는 표면 원자의 영



향을 증폭시키며, 표면 원자들은 벌크 물질의 경우보다 더 느슨하게 결합되어 있어서 나노 입자의 용융을 촉진한다. Fig. 2는 금 입자의 크기에 따른 녹는점을 나타낸다. 금의 경우 1~3 nm 크기의 금 나노 입자는 열역학적 크기 효과에 의해 벌크 물질(1,063°C)에 비해 상당한 녹는점 강하(130°C~140°C)를 보인다[11]. 이와 같은 나노 입자의 크기에 따라 녹는점이 감소하는 특징을 공정에 활용하면 저온에서 플라스틱과 같은 기판에 금속 증착이 가능하게 된다. 나노 물질의 광학적 특성의 경우, 나노 물질에 따라서 특정 파장을 잘 흡수하는 현상이 나타난다. 위의 성질을 활용하여 나노 입자에는 잘 흡수되고 기판에는 잘 흡수되지 않는 파장을 찾아 기판의 열변형을 최소화하는 공정을 개발할 수 있다. 또한 나노 입자의 경우 벌크 물질보다 결합력이 약하기 때문에 상대적으로 약한 에너지로 공정을 수행할 수 있다. 그 예시로 금과 은 나노 입자의 경우

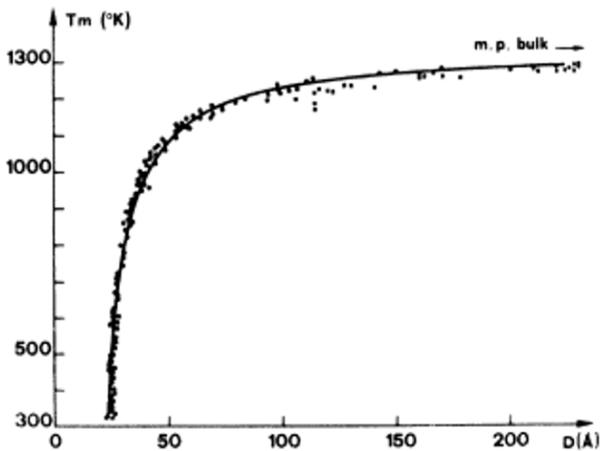


Fig. 2. Experimental and theoretical values of the melting point temperature of gold particles, assuming validity of the first model in order to the Debye-Waller factors : circles, present work; squares, Sambles (Ref. 28); the using all of the experimental points. Adapted with permission from [11]. Copyright 1976, American Physical Society.

녹색 파장 영역에서 강한 레이저 광 흡수율을 보인다. 이처럼 금속 나노 입자의 경우 크기에 따라 녹는점이 감소하고 증착된 나노 입자 박막의 낮은 열 확산율, 특정 파장의 빛을 강하게 흡수하는 고유한 광학적인 특성, 그리고 다양한 잉크 특성을 가진 나노 입자의 합성이 용이하기 때문에 선택적 레이저 소결 공정에 가장 적합하다[12].

선택적 레이저 소결 공정의 과정은 Fig. 3과 같다. 우선 금속 나노 입자 잉크를 플라스틱과 같은 물질 기판 위에 스핀 코팅이나 잉크젯 프린팅 등을 통해 코팅한다. 그 다음 코팅된 나노 입자 박막을 computer-aided design(CAD)과 같은 소프트웨어를 이용하여 패턴을 만든 뒤 레이저를 통해 선택적으로 녹여준다. 레이저를 통해 선택적으로 녹기 전의 금속 나노 입자들은 유기물로 코팅이 되어 있어 전도성이 나타나지 않지만, 레이저에 의해 코팅이 제거되어 서로 연결이 되면서 회로를 형성하게 된다. 패턴에 해당하는 영역을 레이저를 통해 선택적으로 소결한 이후 유기 용매를 이용하여 녹지 않은 영역의 나노 입자들을 제거한다.

선택적 레이저 소결 공정은 현재 가장 많이 사용되고 있는 포토리소그래피 공정과 비교했을 때 많은 장점을 가진다. 우선 선택적 레이저 소결 공정은 진공과 포토마스크를 필요로 하지 않는다. 진공을 필요로 하지 않는다는 점은 진공에 도달하는 시간도 제거하는 것이기 때문에 기존에 비해 고속공정을 가능하게 한다. 그리고 위 공정은 CAD를 이용하여 패턴을 형성할 수 있기 때문에 패턴의 변경 시 새로운 포토마스크를 제작해야 하는 포토리소그래피에 비해 시간과 비용이 절약되는 장점을 가진다. 또한 위에 서술한 바와 같이 열역학적 크기 효과로 인해 플라스틱과 같은 유연 기판에 가해지는 열 손상을 줄여 유연기판에서도 공정 수행이 가능하다. 그리고 금속 패턴과 플라스틱 기판의 접착성이 양호하다는 점도 레이저 소결 공정의 중요한 장점 중 하나이다[13].

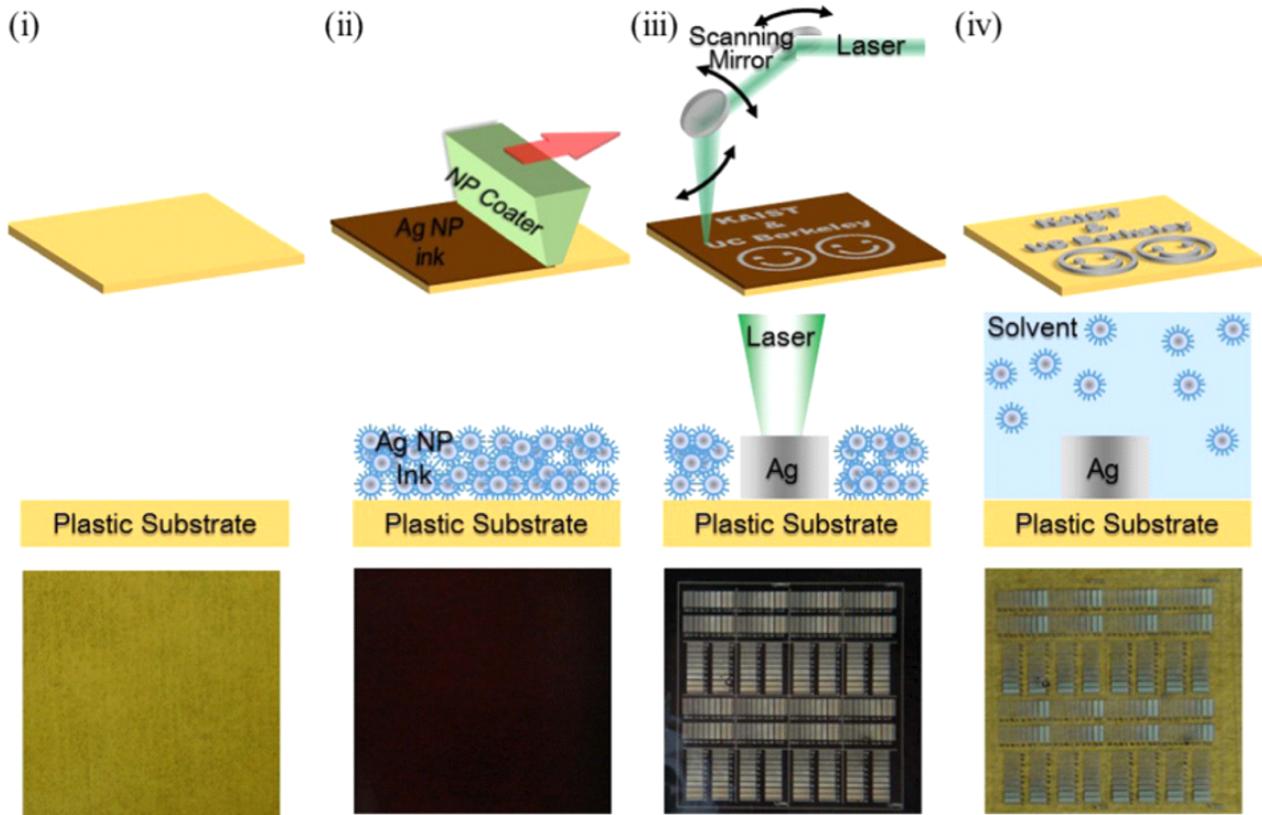


Fig. 3. Digital direct metal patterning process on a flexible plastic substrate at room temperature and atmospheric pressure; the process schematics; (i) a polymer substrate preparation, (ii) Ag NP ink coating on a polymer substrate, (iii) laser scanning and local melting of the printed Ag NP ink film, (iv) washing out non-laser-processed Ag NPs to leave laser-processed Ag patterning on a polymer substrate. The middle row shows the cross section and the bottom row shows the top view. Adapted with permission from [12]. Copyright 2012, PLOS ONE.

3. 선택적 레이저 소결을 통한 유연 인쇄 전자소자 제작

3.1. 유연 박막 트랜지스터

무기 반도체의 대안으로 용액 처리 공정이 가능한 고분자 반도체 기반의 유기 전계 효과 트랜지스터 (organic field effect transistor)는 놀라운 성능 향상을 이루었다. 이러한 소자는 값싼 고분자 기판 위에서 저비용, 대면적의 전자 제품을 구현하기 위해 개발되었다.

앞에서 서술한 바와 같이 포토리소그래피 공정은 고

온 공정, 독성이 강한 화학물질을 사용한다는 점에서 유연 전자소자에 사용되는 고분자 기판에 적절하지 않다. 직접 쓰기 공정 중 잉크젯 프린팅의 경우 포토리소그래피 공정을 필요로 하는 마이크로 콘택트 프린팅과 같은 다른 직접 쓰기 공정 방식과 비교했을 때 마스크가 필요 없다는 장점을 가진다. 하지만 잉크젯 프린팅의 경우, 해상도 관련 문제나 금속 입자를 사용할 때 금속 입자 간의 전기적 연결이 제대로 형성되지 않아 전도성이 보장되지 못한다는 단점이 있다[15,16].

이러한 단점을 극복하기 위해 나노 입자 형태의 금

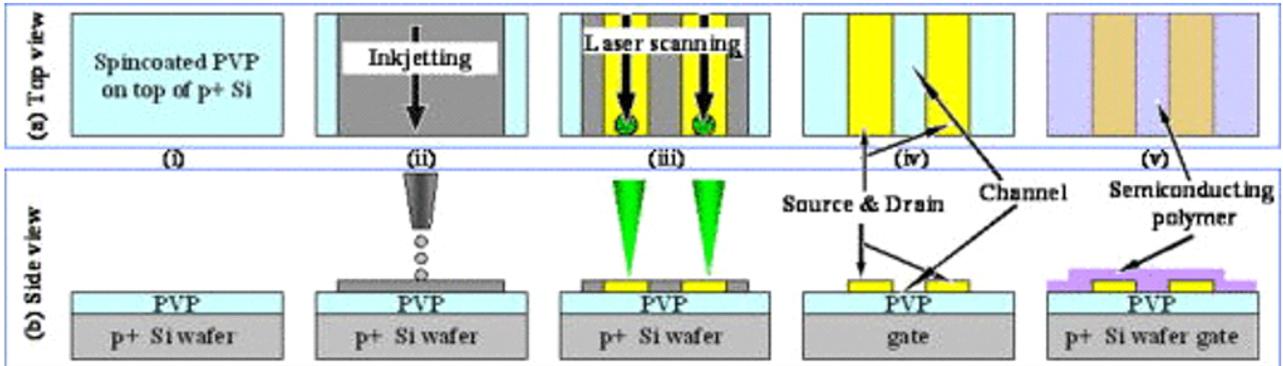


Fig. 4. (Color online) Process steps for the OFET fabrication by selective laser sintering of metal nanoparticle ink. Top views (upper row) and side views (lower row) for OFET fabrication process. (i) Spin coating a PVP dielectric layer on top of a highly doped p^+p^+ silicon wafer. Cross-linking PVP on a hot plate. (ii) Ink-jet printing of gold nanoparticle ink (arrow indicates scanning direction, linewidth $\sim 100 \mu\text{m}$). (iii) Scanning a focused Ar ion beam on an ink-jet printed nanoparticle ink line (arrow indicates scanning direction, yellow color represents selectively sintered gold nanoparticles with linewidth $\sim 10 \mu\text{m}$). The scanning was repeated to make two parallel lines which are used as source and drain electrodes. The gap between two lines is a channel for OFET (channel: $1\text{--}10 \mu\text{m}$). (iv) Washing out leftover unsintered nanoparticles, exposing two gold electrodes. (v) Spin coating carboxylate-functionalized polythiophenes in warm $oo\text{-DCB}$. Drying and annealing semiconducting polymer. Adapted with permission from [14]. Copyright, 2007, AIP Publishing.

속 물질을 이용하여 잉크젯 프린팅과 레이저 공정을 조합하는 방법이 개발되었다. Fig. 4는 유기 전계 효과 트랜지스터를 잉크젯 프린팅을 한 금속 나노 입자 잉크에 레이저 소결 및 식각(ablation)을 통해 제작한 과정을 보여준다. 게이트 전극의 경우 잉크젯 프린팅을 한 후 아르곤 이온 레이저 빔(Ar ion laser beam)을 통해 선택적으로 소결하여 제작했다. 여기서 사용되는 잉크의 경우 금 나노 입자의 크기를 제어하고 안정성 강화 및 원하는 광학적 특성을 얻기 위해 자기 조립 박막(self-assembled monolayer)으로 캡슐화 하여 합성했다. 이후 소결되지 않은 나노 입자 잉크는 소결된 좁은 폭의 게이트를 남겨두기 위해 제거했다. 이어서 소량의 가교제(cross-linked agent)가 있는 헥사놀에 PVP (poly-4-vinylphenol) 를 용해시킨 뒤 앞에서 레이저를 통해 소결한 게이트의 상부에 잉크젯 프린팅을 한 뒤 150°C 에서 가교했다. 이후 소스(source)와 드레인(drain)

의 형성을 위해 유전체 층 위에 나노 입자 잉크를 잉크젯 프린팅 했다. 소결되지 않은 잉크젯 프린팅한 나노 입자 잉크에 좁은 채널을 형성하기 위해 레이저를 이용하여 식각했다. 그 후 식각되지 않고 남은 소결되지 않은 나노 입자 잉크에 선택적 레이저 소결을 수행하여 소스와 드레인 전극을 형성했다. 마지막으로 레이저 소결 및 세척 후 누설 전류를 줄이기 위해 공기에 안정적인 반도체 고분자를 채널 위에 잉크젯 프린팅을 통해 코팅한 뒤 120°C 에서 3분간 어닐링을 실시했다 [17].

위와 같은 방법을 통해 만든 유기 전계 효과 트랜지스터는 전형적으로 게이트가 바닥에서 접촉을 하는 형상을 갖는다. 레이저 식각 공정을 통해 제조한 트랜지스터의 채널의 길이는 잉크젯 프린팅된 금속 나노 입자 잉크의 선택적 레이저 식각에 의해 결정되고 모든 전극은 선택적 레이저 소결에 의해 형성된다.



기존의 유기 반도체 고분자는 공기에 민감했기 때문에 고분자 재료의 가공, 기기 제조 등의 단계에서 진공이나 무산소 환경을 필요로 했다. 하지만 이러한 조건은 생산 과정에서 시간과 비용을 증가시키는 문제점을 가진다. 레이저 소결 및 식각 공정을 활용하여 만든 트랜지스터를 정규화된 드레인 전류에서 각각 다른 채널 길이, 채널 폭, 전계 효과 이동성을 비교했을 때 기존 공법에 의한 소자들과 유사한 전달 특성이 관찰되었다. 이를 통해 나노 입자를 레이저 소결 및 식각을 통해 기존의 유기 전계 효과 트랜지스터와 비슷한 성능을 가진 트랜지스터를 생산할 수 있음이 밝혀졌다. 실제로 레이저 공정을 통해 만든 트랜지스터 연구에서는 기존의 트랜지스터에 비해 약간 낮은 성능을 보였으나, 본 연구에서 사용된 반도체 고분자의 경우 공기 안정성을 위해 이동성 감소가 감수되었다는 점을 고려했을 때 이동성이 더 높은 반도체 고분자를 사용한다면 성능이 향상될 수 있을 것이다[18].

3.2. 유연 투명 전도체

투명 전도체는 터치 스크린 패널이나 LCD와 같은 광전자제품(optoelectronics)의 필수적인 요소로 다양한 분야에서 유연 장치가 개발됨에 따라 그 수요가 늘고 있다. 현재까지 투명 전도체에는 시트 저항이 낮으며 광학적으로 투명한 transparent conductive oxides (TCO)나 indium tin oxide(ITO)가 널리 사용되고 있다 [19]. 하지만 희소성과 취약성 같은 단점을 가지고 있기 때문에 투명 전도체에 사용될 소재를 찾는 연구가 필요하다.

ITO를 대체할 물질로 전도성 고분자와 탄소 기반의 소재들이 제시되었다. 하지만 이들의 성능은 전도성이나 안정성 부분에서 단점을 가지고 있다. 또 다른 대안으로는 금속 그리드나 무작위 금속 나노와이어 메쉬가 제시되었다. 나노와이어의 경우 투과율이나 전기 전도

도 측면에서 우수한 결과를 나타냈다[20]. 하지만 나노와이어에 의해 형성된 전도막의 성능은 나노와이어의 길이에 영향을 크게 받고 있다. 또한 나노와이어로 형성된 필름의 경우, 스크래치에 취약하며 접착력이 약하다는 단점을 가지고 있다[21].

이런 단점을 극복하기 위해 선택적 레이저 소결을 이용한 금속 그리드 형태의 투명 전도체가 개발되었다. 레이저 소결 공정을 통해 투명 전도체를 만드는 과정은 Fig. 5와 같다. 우선 유리 기판과 은 나노 입자 사이의 접착력을 증가시키기 위해서 얇은 PVP 막을 코팅했다. 이후 은 나노 입자를 스핀 코팅 방법을 통해 유리 기판 위에 코팅했다. 은 나노 입자들이 더 크게 뭉치는 것을 예방하기 위해 자기 조립 박막에 의해 캡슐화되었다. Fig. 5(b)는 캡슐화된 은 나노 입자를 transmission electron microscope(TEM)로 촬영한 것이다. 이후 레이저와 렌즈를 통해 은 나노 입자를 선택적으로 소결하여 자기 조립 박막을 제거하고 은 나노 입자들을 연결하여 전도성을 띠게 했다. 소결되지 않은 나머지 은 나노 입자들을 유기 용매를 이용하여 세척했다. Fig. 5(c)에서 위와 같은 과정을 통해 제조된 투명 전도체는 세척 이후에도 투명함을 유지하는 것을 확인할 수 있다. 은 나노 입자들은 레이저 소결 이후 연속적으로 연결되어 높은 전도성을 보였으며 소결되지 않은 나노 입자들의 경우 세척 후 제거되었다. 위의 공정을 통해 연결된 은 나노 입자 전도체는 벌크 상태의 은보다 저항이 높았으나 미세 전도체에 사용하기에 충분했다. 또한 투과율의 경우, 레이저 소결 공정을 이용할 경우 ITO를 사용한 투명 전도체와 비슷한 수준의 투과율을 나타냈다.

위에서 서술한 바와 같이 선택적 레이저 소결 공정은 저온 공정으로 열이 국소적으로 영향을 미치지 때문에 유연 기판에 직접 사용할 수 있다. Fig. 6(a)는 레이저 소결 공정을 이용하여 유리 전이 온도가 낮은 기판에 금속 투명 전도체를 제작한 것이다. 공정 이후에

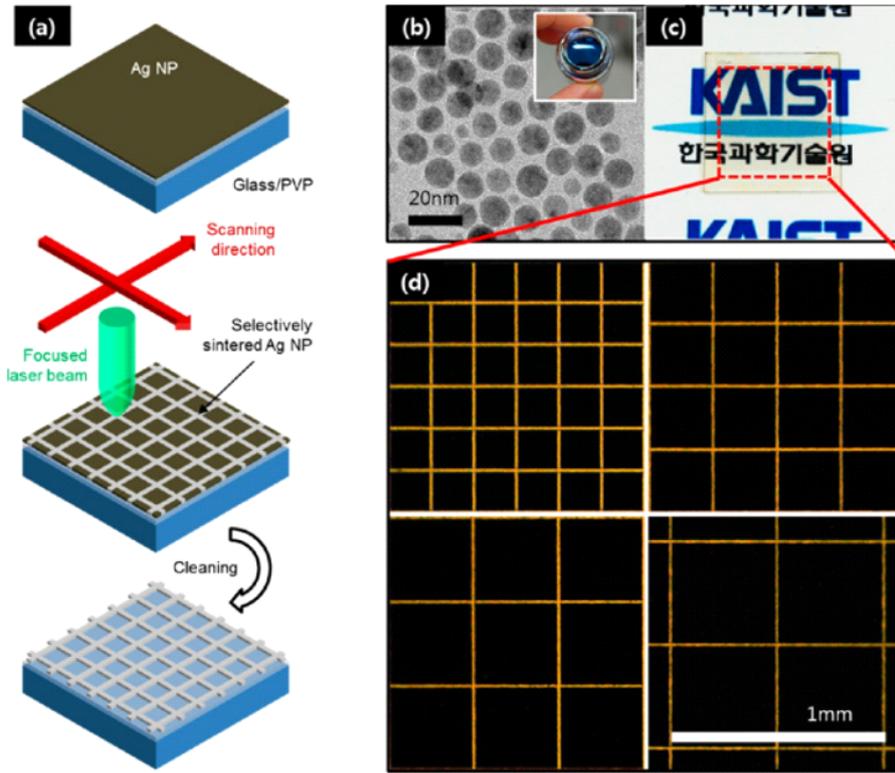


Fig. 5. (a) Schematic diagram of selective laser sintering of Ag NPs for the fabrication of a transparent conductor. (b) TEM image of synthesized Ag NPs (inset: optical photograph of Ag NP ink). (c) Photograph of a transparent conductor on a glass substrate (metallic grid in the red-boxed region). (d) Optical stereoscope images of square-metallic grids at different grid sizes (200 to 500 μm , increment 100 μm). Adapted with permission from [21]. Copyright 2013, ACS Publications.

기판에서 열에 의한 손상이 발견되지 않았다. 이 전도체의 경우 유리 기판 상에 제작된 것과 유사한 저항을 보였다. 또한 위와 같은 금속 그리드를 스캔하는데 3분 미만의 시간이 걸렸는데 이를 통해 대면적에 고속으로 공정을 적용할 수 있음을 확인하였다. Fig. 6(b)는 레이저 소결 공정을 통해 제조한 금속 그리드와 기판 사이의 접착력을 확인하기 위해 굽힘 변형을 가한 것이다. Fig. 6(c)를 통해 나노와이어를 이용하여 제작한 투명 전도체의 경우, 굽힘 변형에 의해 대부분의 나노와이어가 기판에서 분리되었으나, 레이저 소결 공정을 통해 제작한 경우에는 형태의 변화가 거의 나타나지 않았다. 이를 통해 레이저 소결 공정을 적용할 경우

소결된 금속 패턴과 기판 사이의 접착력도 향상됨을 알 수 있었다[22].

4. 결론 및 전망

본 리뷰에서는 선택적 레이저 소결 공정과 레이저 공정 기반의 유연인쇄전자소자의 제작에 대해 알아보았다. 현재 가장 많이 사용되는 공정 중 하나인 포토리소그래피는 여러 고온 공정들과 부식성이 강한 화학물질들을 사용하기 때문에 플라스틱과 같은 유연 기판에 적합하지 않다. 또한 진공장비나 포토마스크와 같은 고가의 장비들을 필요로 하는 고비용 공정이다. 따라

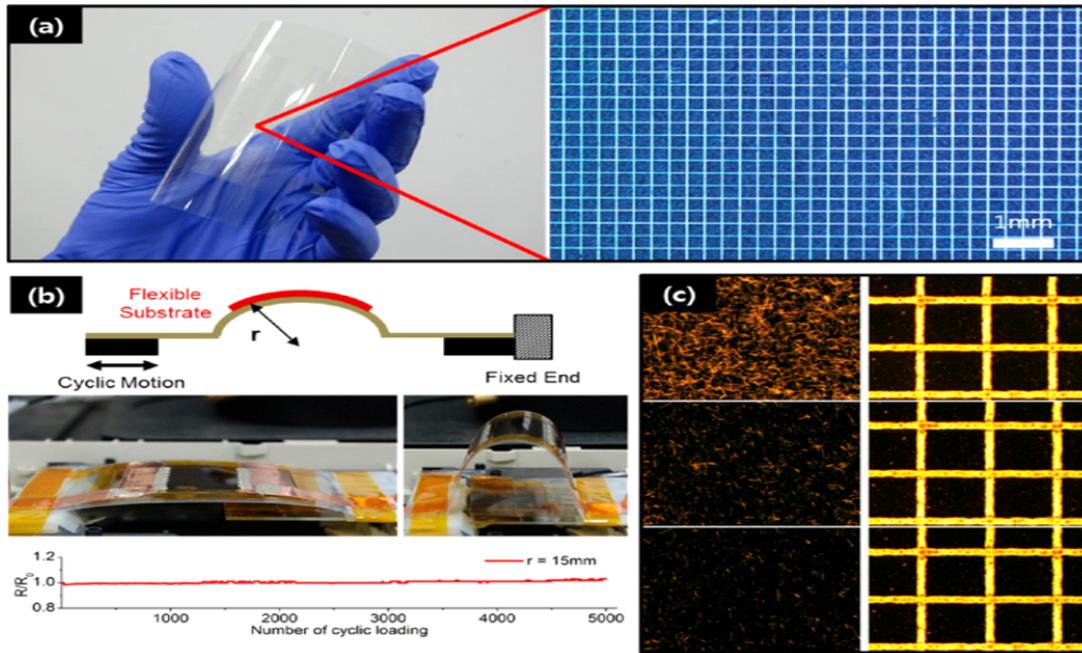


Fig. 6. Adapted with permission from [21]. Copyright 2013, ACS Publications. (a) Transparent conductor fabricated on a flexible (PEN) substrate (metallic grid on a 5 cm×5 cm region). (b) Test setup of cyclic bending, photograph of minimum and maximum bending deformation of the sample carrier of a flexible substrate, and resistance change according to the number of cyclic bending. (c) Optical image of a transparent conductor made of Ag NW mesh (left column) and Ag NP sintering (right column) as-prepared (first row), after first adhesive tape test (second row), and after second adhesive tape test (third row).

서 플라스틱과 같은 유연 기판에 패터닝을 하기 위해서는 새로운 공정의 개발이 요구된다.

본론 2에서는 포토리소그래피 공정의 대안으로 선택적 레이저 소결 공정에 대해 소개하였다. 나노 물질의 경우, 벌크 상태에 비해 녹는점이 낮고 특정 파장의 빛을 잘 흡수하기 때문에 상대적으로 낮은 온도와 에너지를 가지는 레이저 공정이 가능하다. 본론 3에서는 선택적 레이저 소결 공정을 활용하여 유연 박막 트랜지스터나 유연 투명 전도체와 같은 유연 인쇄 전자소자를 제작하는 것에 대해서 소개하였다. 본론 3.1.에서 선택적 레이저 소결을 통해 제작한 유연 박막 트랜지스터의 경우 기존의 존재하던 트랜지스터와 유사한 성능의 트랜지스터의 개발 가능성을 보였다. 본론 3.2.의 유연 투명 전도체의 경우 선택적 레이저 소결 공정을

사용한 경우 ITO와 비슷한 수준의 투과율을 나타냈으며, 미세 전도체에 활용이 가능한 수준의 낮은 저항을 보였다. 또한 나노와이어와 비교했을 때 기판과의 접착력이 더 우수한 것도 확인할 수 있었다. 이와 같이 저온의 환경에서 직접 패터닝이 가능한 선택적 레이저 소결 공정은 기존의 포토리소그래피와 비교했을 때 저비용이고 고속으로 처리가 가능하며 대면적으로 생산할 수 있다는 점에서 가능성을 인정받고 있다.

이외에도 금, 은, 산화아연, 구리 등 다양한 금속 나노 입자들을 사용하여 유연 디스플레이, 유연 태양 전지, 유연 변형률 센서 등의 분야에 대한 연구가 수행되고 있다. 이에 더해 최근에는 다양한 나노 물질들을 사용하여 웨어러블 센서와 바이오 분야에서 다양한 연구가 이루어지고 있다. 향후 더 나은 성능을 갖는 고분



자 물질 기반 유연 기판의 개발과 더 얇은 선풍을 가질 수 있게 하는 렌즈의 개발이 이루어진다면 더 다양한 분야에서 활용될 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENTS

Author Contributions

S.J. Yoon and J. Min wrote the manuscript. J. Min and S.H. Ko designed overall concept of the article. S.J. Yoon discovered on specific topics. S.H. Ko supervised on overall writing process.

Funding

Not applicable.

Declarations of Competing Interests

The authors declare that they have no competing interests

AUTHORS



윤상진
2016~현재: 서울대학교 기계공학부 재학
[관심분야] 유연성 기판을 기반으로 한 투명 전자소자 개발 및 응용



민진기
2014~2017년 서울대학교 조선해양공학과 학사학위
2017~현재: 기계공학부 박사과정
[관심분야] 유연성 물질을 기반으로 한 다양한 에너지를 활용한 에너지 소자 및 응용



고승환
2013~현재: 서울대학교 기계공학부 교수
2009~2013: 카이스트 기계공학부 교수
2006~2009: UC Berkeley 박사후연구원
2002~2006: UC Berkeley 공학박사
[관심분야] 신축/유연성 전자소자, 투명 전자소자, 소프트 로봇, 웨어러블 전자 소자, 레이저 기반 나노/마이크로 공정

REFERENCES

- [1] Cui, Z. Printed Electronics: Materials, Technologies and Applications; Higher Education Press: Beijing, 2012.
- [2] Lin, Y.; Gritsenko, D.; Liu, Q.; Lu, X.; Xu, J. Recent Advancements in Functionalized Paper-Based Electronics. ACS Appl. Mater. Interfaces 2016, 8, 20501-20515.
- [3] Wang, X.; Liu, J. Recent Advancements in Liquid Metal Flexible Printed Electronics: Properties, Technologies, and Applications. Micromachines, 2016, 7 (1), 206.
- [4] Yin, Z.; Huang, Y.; Bu, N.; Wang, X.; Xiong, Y. Inkjet Printing for Flexible Electronics: Materials, Processes and Equipments. Chin. Sci. Bull. 2010, 55, 3383-3407.
- [5] Wong, W. S.; Salleo, A. Flexible Electronics: Materials and Applications; Springer: New York, NY, 2009.
- [6] Mack, C. A. Field Guide to Optical Lithography, SPIE Press, Bellingham, WA, 2006.
- [7] Redinger, D.; Molesa, S.; Yin, S.; Farschi, R.; Subramanian, V. An Ink-Jet-Deposited Passive Component Process for RFID. IEEE Trans. Elect. Device. 2004, 51 (12), 1978-1983.
- [8] Ko, S. H. Status of Research on Selective Laser Sintering of Nanomaterials for Flexible Electronics



- Fabrication. *Transa. Korean Soc. Mech. Engineer. B.* 2011, 35 (5), 533-538.
- [9] Link, S.; El-Sayed M. A. Spectral Properties and Relaxation Dynamics of Surface Plasmon Electronic Oscillations in Gold and Silver Nanodots and Nanorods. *The J. Phys. Chem. B.* 1999, 103, 8410-8426
- [10] Ko, S. H. Research Status on Flexible Electronics Fabrication by Metal Nano-particle Printing Processes. *Particle and Aerosol Research.* 2010, 6 (3), 131-138.
- [11] Buffat, P.; Borel, J. P. Size Effect on the Melting Temperature of Gold Particles. *Phys. Rev. A.* 1976, 13 (6), 2287.
- [12] Yeo, J.; Hong, S.; Lee, D.; Hotz, N.; Lee, M. T.; Grigoropoulos, C. P.; Ko, S. H. Next Generation Nonvacuum, Maskless, Low Temperature Nanoparticle Ink Laser Digital Direct Metal Patterning for a Large area Flexible Electronics, *PLoS ONE.* 7 (8), e42315, 2012.
- [13] Ko, S. H. Low Temperature Thermal Engineering of Nanoparticle Ink for Flexible Electronics Applications. *Semicond. Sci. Technol.* 2016, 31 (7), 073003.
- [14] Ko, S. H.; Pan, H.; Grigoropoulos, C. P.; Luscombe, C. K.; Fréchet, J. M.; Poulidakos, D. Air Stable High Resolution Organic Transistors by Selective Laser Sintering of Ink-Jet Printed Metal Nanoparticles. *Appl. Phys. Lett.* 2007, 90 (14), 141103.
- [15] Zschieschang, U.; Klauk, H.; Halik, M.; Schmid, G.; Dehm, C. Flexible Organic Circuits with Printed Gate Electrodes. *Adv. Mater.* 2003, 15 (14), 1147-1151.
- [16] Sirringhaus, H.; Shimoda, T. Inkjet Printing of Functional Materials. *MRS Bull.* 2003, 28 (11), 802-806.
- [17] Ko, S. H.; Pan, H.; Grigoropoulos, C. P.; Luscombe, C. K.; Fréchet, J. M.; Poulidakos, D. All-Inkjet-Printed Flexible Electronics Fabrication on a Polymer Substrate by Low-Temperature High-Resolution Selective Laser Sintering of Metal Nanoparticles. *Nanotechnology.* 2007, 18 (34), 345202.
- [18] Ko, S. H.; Pan, H.; Grigoropoulos, C. P.; Fréchet, J. M.; Luscombe, C. K.; Poulidakos, D. Lithography-Free High-Resolution Organic Transistor Arrays on Polymer Substrate by Low Energy Selective Laser Ablation of Inkjet-Printed Nanoparticle Film. *Appl. Phys. A.* 2008, 92 (3), 579-587.
- [19] Gordon, R. G. Criteria for Choosing Transparent Conductors. *MRS Bull.* 2000, 25 (8), 52-57.
- [20] Lee, J.; Lee, P.; Lee, H.; Lee, D.; Lee, S. S.; Ko, S. H. Very Long Ag Nanowire Synthesis and Its Application in a Highly Transparent, Conductive and Flexible Metal Electrode Touch Panel. *Nanoscale* 2012, 4, 6408-6414.
- [21] Zeng, X. Y.; Zhang, Q. K.; Yu, R. M.; Lu, C. Z. A New Transparent Conductor: Silver Nanowire Film Buried at the Surface of a Transparent Polymer. *Adv. Mater.* 2010, 22, 4484-4488.
- [22] Hong, S. J.; Yeo, J. Y.; Kim, G. H.; Kim D. K.; Lee, H. B.; Kwon, J. H.; Lee, H. M.; Lee, P.; Ko, S. H. Nonvacuum, Maskless Fabrication of a Flexible Metal Grid Transparent Conductor by Low-Temperature Selective Laser Sintering of Nanoparticle Ink. *ACS Nano.* 2013, 7 (6), 5024-5031.