

투명 전극에 적용되는 도핑된 나노튜브

스탠포드대학(Stanford University)의 연구진은 열-활성화된 폴리브덴 산화물을 사용해서 탄소 나노튜브를 도핑할 수 있는 간단한 방법을 개발했다. 기존의 도핑 방법에서는 도펀트(dopant)가 탄소 나노물질의 전기적 및 광학적 성질에 영향을 끼쳐서 많은 문제를 발생하는데 반해서 이 방법은 이런 성질에 영향을 끼치지 않았다.

탄소나노튜브는 뛰어난 광학적 및 전기적 성질을 가지고 있기 때문에 터치스크린, 평면 패널 디스플레이, 태양 전지의 투명 전극에 매우 유망하게 적용될 수 있을 것이다. 불운하게도, 탄소나노튜브는 전기 저항이 너무 높고 전기 전도성이 너무 낮기 때문에 이런 장치에 직접 적용될 수 없다.

탄소나노튜브의 전기적 성질들은 도핑에 의해서 변화될 수 있는데, 이것은 재료 속의 자유 전하 캐리어(전자와 홀)의 수를 증가시킨다. 또한 도핑은 금속 탄소나노튜브와 반도체 탄소나노튜브 사이를 더 쉽게 지나가게 하기 때문에 튜브 접합의 저항을 감소시킨다(탄소나노튜브는 금속 튜브와 반도체 튜브가 혼합되어 있는 형태를 가진다).

그러나 문제점도 존재한다: 산소 흡수(p 도핑된 탄소나노튜브)와 부분 화학 산화와 같은 가장 일반적인 도핑 방법으로는 이것을 제어하기가 종종 어려울 수 있고 궁극적으로 전기 전도성을 더 감소시킬 수 있는 상당한 수의 결함이 발생할 수 있다. 알칼리 금속과 할로젠, 산과 질산염

과 같은 다른 도펀트들은 튜브의 전기적 및 광학적 성질들이 우수한 상태로 남아 있게 하지만 공기 중에서 불안정한 튜브를 만들어낸다.

Zhenan Bao와 연구진은 열적 활성화된 폴리브덴 산화물(MoO_x)이 탄소나노튜브를 위한 이상적인 도펀트가 될 수 있다고 말했다. 연구진은 특정 공정 조건들(특히 약 450°C 의 가열 단계에서)이 MoO_x 와 탄소나노튜브 간의 전하 이동을 유발한다는 것을 발견했다. 이런 전하 이동이 유도되었다면, 처리된 탄소나노튜브는 이후의 산화에서 또는 재가열에서 상당히 안정하고 뛰어난 전기적 및 광학적 성질을 가진다.

MoO_x 는 유기 반도체 도핑을 위해서 사용되었지만, 이것은 비효율적 혹은 불안정적인 도펀트로 알려져 있다. 연구진은 MoO_x 가 탄소나노튜브와 그래핀에 강하고 안정적으로 도핑될 수 있다고 보고했다. 열 어닐링된 MoO_x -탄소나노튜브 복합물은 PEDOT:PSS 층을 가진 83% 투과도에 85 Ω/sq 와 85% 투과율에서 100 Ω/sq 의 시트 저항을 가진 아주 얇은 층을 형성할 수 있다. 시트 저항은 대기 중에서 20일 이상 동안 10% 이하와 공기 중에서 하룻밤 동안의 300°C 가열을 거친 2% 이하로 변한다. MoO_x 는 열 증착에 의해서 또는 용액 기반의 전구물질 중의 하나로 쉽게 증착될 수 있다. 높은 전도성과 뛰어난 안정성은 MoO_x -탄소나노튜브 복합물이 투명 전극에 적용하는데 매우 뛰어난 후보자가 될 수 있다는 것을 보여준다.

MoO_x 는 그래핀을 도핑하는데도 사용될 수 있다고 연구진은 덧붙였다. 이 연구결과는 저널 *Nano Letters*에 “Strong and Stable Doping of Carbon Nanotubes and Graphene by MoO_x for Transparent Electrodes”라는 제목으로 게재되었다.

<S. L. Hellstrom et al., *Nano Lett.*, **12**, 3574 (2012), DOI: 10.1021/nl301207e>

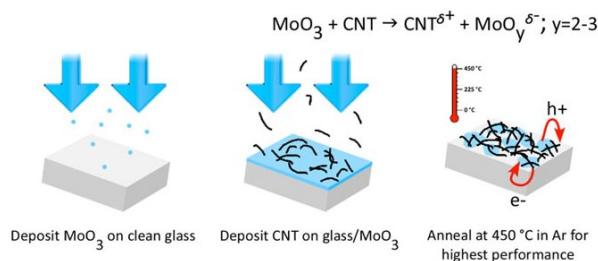


그림 1. MoO_x -탄소나노튜브 투명 전도체를 만드는 방법을 보여주는 모식도.

투명 그래핀을 이용한 차량용 서리 제거 코팅

최근 투명하고 유연한 그래핀 히터가 등장했지만 시스템 자체의 복잡성 때문에 관련한 열 수송 메커니즘에 대해서는 정확히 알려진 바가 없다. 그래핀은 유연하고, 투명하며, 또한 전기적 전도성을 바탕으로 “유연한 투명 히터” 개발을 위한 잠재력 있는 물질이다[GTB2011110645]. 현재 단일층 그래핀은 통상적인 금속 박막에 비해 고온 영역에서의 한계가 존재한다. 하지만 그래핀은 야외용 디스플레이 및 차량용 서리 제거(defroster)와 같은 새로운 기능성 영역의 개척이 가능하다.

성균관대학교 이영희 교수가 이끄는 연구진은 그래핀/유리 기판으로 구성된 서리 제거 장치를 개발하고, 온도에 따른 다양한 현상들을 관찰함으로써 관련된 열 수송 메커니즘을 규명하는데 성공했다. 연구 결과는 2012년 7월 3일자 *Advanced Functional Materials*지에 “Heat Dissipation of Transparent Graphene Defogger”란 제목으로 게재됐다.

지금까지 탄소나노튜브, 환원된 산화 그래핀, 그리고 그래핀과 같은 다양한 탄소 물질을 이용한 유연한 투명 히터 개발이 소개되고 있다. 특히 그래핀의 경우 최근 집중적인 연구를 통해 40 인치 대면적 합성 및 정교한 전사(transfer)가 가능해졌다. 따라서 유연한 투명 히터 및 서리 제거와 같은 다양한 기능성 소자 제작이 가능하다. 기존의 연구를 살펴보면, 인가된 전압 및 파워에 따라서 히팅 시스템의 성능이 결정된다. 히터의 면저항을 낮추는 것이 시스템의 성능을 최대로 이끌어낼 수 있는 것으로 설명된다. 하지만 현재 히팅시스템을 살펴보면 방사열 및 열 대류에 따른 손

실을 피할 수 없다. 히터의 열 성능은 위의 두 손실과 함께 열평형 상태를 이루게 된다.

대류성 열전달은 그래핀과 기판 사이의 계면에서 포논(phonon) 커플링에 따른 것이고, 방사열의 경우 대기 중의 분자가 표면에 흡착/탈착함으로써 손실이 발생한다. 전자의 경우 대류성 열전달 속도를 결정하는 반면, 후자의 경우 서리 제거 시스템의 최종 온도를 결정짓는 요소라 할 수 있다.

연구진은 먼저 유리 기판 위에 화학기상증착법을 통해 합성된 그래핀을 전사했다. AuCl₃를 이용한 LbL(layer-by-layer) 전사 공정을 통해 면저항을 낮출 수 있었다. 그리고 그래핀에 상응하는 면저항을 갖는 크롬/유리 샘플을 제작했다. 동일한 면저항 특성을 가지고 두 시스템의 열전달 특성을 확인하고자 하는 것이다.

그래핀/유리 시스템은 주어진 파워에 대해 크롬의 경우보다 44% 짧은 시간안에 포화 온도에 이를 수 있었다. 또한 포화온도 역시 동일한 조건에 대해 크롬/유리 시스템보다 높게 나타났다. 또한 크롬 표면은 주변 대기 중에 존재하는 산소, 질소, 그리고 수증기에 대해 높은 흡착 에너지를 가지고 있기 때문에, 그림 2와 같이 분자를 흡착/탈착 하는 과정에서 열을 손실하게 된다. 그래핀은 다른 탄소 물질인 탄소나노튜브, 환원된 산화 그래핀에 비해 매우 평평하기 때문에 서리 제거 시스템에서 가장 잠재력이 높은 물질로 평가된다.

<J. J. Bae et al., *Adv. Funct. Mater.* (2012),

DOI: 10.1002/adfm.201201155>

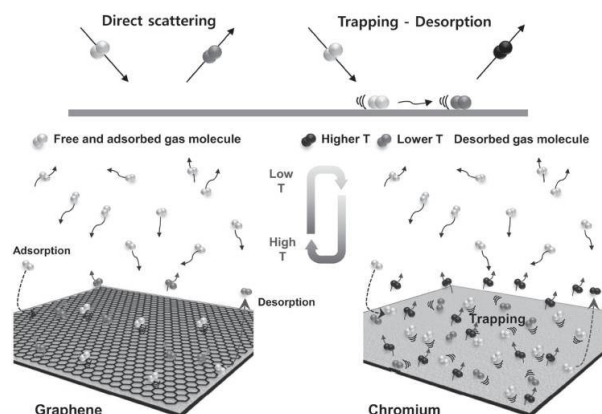


그림 2. (상) 대기 가스 성분과의 직접 산란 및 트랩-탈착 과정에 대한 모식도, (하) 그래핀 및 크롬 박막으로 제작된 서리 제거 시스템의 열 에너지 전달 특성에 대한 모식도.

색 변화를 기반으로 하는 종이 센서의 개발

서로 다른 이온, 용액, 및 UV 방사에 반응하여 색을 변화시키는 능력을 지닌 종이가 미국의 연구자들에 의해 개발되었으며 이는 빠르고 안정적인 화학 센서를 개발하는 데 이용될 수 있을 것으로 보인다.

이번 연구에서는 2000년 전에 처음으로 만들어진 물질인 종이가 폴리디아세틸렌(polydiacetylenes, PDAs)을 이용함으로써 종이를 이용한 센싱 기능을 보여주었던 샌디아 국립연구소(Sandia National Laboratory)의 Hongyou Fan에 의해 재료 물질로 이용되었다. PDA는 센싱 분야에 응용이 가능한 것으로 알려져 있지만 박막 필름이나 파우

터와 같은 구조에서도 응용이 가능하다.

PDA를 종이에 적용시킴으로써, 연구팀은 박막 필름이나 파우더보다 더 큰 민감도를 지니고 더 빨리 기능을 발휘할 수 있도록 보다 대면적을 지닌 센서를 만들 수 있었다. 연구진은 연구를 통해 센서 종이(sensor paper)가 종이에 노출되는 금속 이온의 종류에 따라 붉은색에서부터 갈색을 거쳐 자색에 이르기까지 색이 변한다는 사실을 보여주었다.

처음에는 준비된 종이가 이온들에 반응을 보이지 않았지만, UV 조사에 의해 종이에 있는 디아세틸렌 와이어(diacetylene wire)가 중합반응을 겪고 난 후에는 색 변화가 관찰되었다. 서로 다른 이온들의 결합이 중합 반응이 일어나기 전에 어떠한 방식으로든지 디아세틸렌의 포지셔닝을 가능하게 한다. 다음으로 UV방사에 의한 중합 반응이 일어나면 분자들의 배열 순서에 의해 색이 변하게 된다.

미국 산타바바라, 캘리포니아대(University of California)의 Jianhua Liu는 “이번 연구는 매우 뛰어난 접근 방법을 가지고 있으며 디아세틸렌 종이(diacetylene paper)의 응용 가능성을 입증한 것이다.”라고 말했다. Fan은 이에 대해 “이렇게 만들어진 종이 센서는 높은 기계적인 강도를 지니고 있으며, 접을 수도 있고, 일반적인 종이처럼 가위로 잘릴 수도 있다. 이러한 이유로 여러 분야에 응용이 가능하다.”고 말했다. 그는 또한 센서의 성능을 향상시키는 연구는 도전적인 일이지만, 이러한 연구를 통해 센서에 보다 잘 이용될 수 있는 종이를 만들고 이러한 종이가 광전압(photovoltaic)이나 발광 종이를 준비하는 데 이용될 수 있을 것이라고 덧붙였다.

<F. Bai et al., *J. Mater. Chem.*, **22**, 14839 (2012), DOI: 10.1039/c2jm33308b>



그림 3. 다양한 종류의 금속 이온에 노출되었을 때, 센서 종이는 각각의 이온에 대해 서로 다른 색을 보여준다.

| 나노 헤테로 접합 태양전지

콜로이드 나노결정 태양전지의 전하 수명을 향상시킬 수 있는 새로운 방법이 스페인 연구원들에 의해 개발되었다. 전자 억셉터와 도너 나노 물질들로 구성된 나노 헤테로 접합을 이용하는 이 기술은 상대적으로 나쁜 광전 특성을 보인 광전 물질에서 높은 양자 효율을 가질 수 있도록 해 줄 것으로 기대된다.

콜로이드 반도체 양자점과 나노결정 기반 용액 처리된 무기물 태양 전지는 양자점 내 밴드갭들이 넓은 에너지 영역에서 조절될 수 있어 폭 넓은 파장 스펙트럼에 걸쳐 빛을 흡수할 수 있기 때문에 매우 유망하다. 또한, 이러한 태양전지는 상대적으로 낮은 가격으로 제조할 수 있다. 하지만, 제한된 몇 가지 물질들만이 이러한 형식의 태양전지로 이용되어 왔다. 2 가지 일반적인 예는 납과 카드뮴 기반 결정들인데, 이들 전하들이 꽤 수명이 길기 때문이다. 긴 전하 수명은 전자와 홀들이 결합하기 전에 소자를 통해 이동하고 유용한 전류로 만들어지기 때문에 태양 전지 물질 내에서 중요하다.

불행하게도, 모든 물질들이 이러한 긴 수명을 가지는 것은 아니라고 바르셀로나 포토닉 과학 연구소의 팀 리더인 Gerasimos Konstantatos가 밝혔다. 그러나, 납-, 카드뮴 기반 양자점들은 독성 원소들을 기반하고 있어서 연구원들은 다른 더 안전한 물질을 활발하게 찾고 있다. 비록 대체 물질들의 광전 특성이 더 나쁘더라도, 이 물질들을 유용한 방법으로 개선하기 위해 새로운 소자 구조가 절실히 필요하다.

연구팀은 전자 억셉터와 도너 물질로 구성된 태양전지 물질에서 벌크 나노 헤테로 접합을 개발하고자 했다. 이 두 물질들은 태양광에 노출될 때, 광발생 전자-홀 쌍들이 나노크기로 분리될 수 있었고 결합하는 전자-홀 쌍의 기회

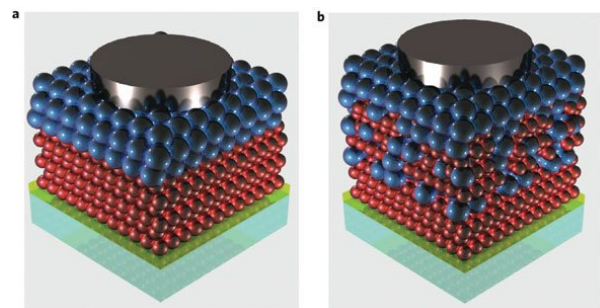


그림 4. 이종층과 나노 헤테로 접합 소자 구조들.

를 줄인 두 가지 매우 다른 나노 경로들을 통해 소자를 따라 이동한다.

연구팀은 p -형 PbS 양자점을 가지고 n -형 Bi_2Si_3 나노결정을 결합함으로써 이중 층 p - n 접합 소자를 만들었다. 연구원들이 제조했던 소자는 평면 p - n 헤테로 접합을 형성하는 p -형 PbS 양자점과 n -형 Bi_2Si_3 나노결정으로 이루어졌다. 두 번째 벌크 나노 헤테로 접합 소자는 Bi_2Si_3 나노결정의 홀 차단/전자 이동 층과 PbS 양자점의 전자 차단/홀 이동 층 사이에 삽입된 PbS 양자점과 Bi_2Si_3 나노결정으로 구성된 나노합성물질로 구성된다. 벌크 나노-헤테로 접합 소자의 전력 전환 효율은 같은 물질로 만들어진 이중층 p - n 접합보다 3배 더 큰 약 4.8%로 확인됐다.

이 향상된 효율의 원인을 밝히기 위해, 연구팀은 광 세기를 변환하며 전지들을 조사하는 동안 소자 내에서 전하의 수명을 조사했다. 두 소자들은 낮은 광 세기에서 긴 수명을 보였지만, 태양의 광세기에 비해 더 큰 세기에서 이중층 소자는 전자와 홀이 더 빠른 비율로 결합하기 때문에 더 짧은 수명을 가졌다. 이와 반대로, 벌크 헤테로 소자 내 전하들은 전자와 홀이 확연히 더 느린 속도로 결합하여 이중층 구조에서보다 3배 더 긴 것으로 나타났다.

연구팀의 전지의 전력 전환 효율이 여전히 PbS 양자점과 타이타니아 n -형 전극 기반 최고 기록의 소자들에 비해 훨씬 더 낮지만, 원리 증명에 대한 해답은 얻었다고 Konstantatos는 믿고 있다. 더욱이, 스퍼터된 산화물 전자 역셉터나 500 °C에서 고온 소결에 의존한 이전 방법들과 달리, 연구팀의 기술은 전체적으로 용액 기반 공정과 저가 물투를 제조를 위한 혜택을 가진 100 °C 이하의 저온 공정을 이용하고 있다.

<A. K. Rath et al., *Nature Photonics*, **6**, 529 (2012), DOI: 10.1038/NPHOTON.2012.139>

히드로겔로 만들어진 새로운 전자 소자

히드로겔을 이용한 새로운 형태의 고성능 에너지 저장 소자가 개발되었다. 미국 스탠퍼드대학의 Zhenan Bao 교수 연구팀은 전도성 폴리머인 폴리아닐린을 이용하여 다공성 나노구조체를 만드는 데 성공했다. 폴리아닐린은 아닐린 단량체를 중합하여 만들어진 전도성을 띠는 고분자 화합물이며, 뛰어난 전기적, 전기화학적 성질을 가지고 있다.

연구팀은 유기물 전도체와 히드로겔의 장점을 살릴 수 있는 새로운 물질을 합성하였다. 유기 전도체인 폴리아닐린의 뛰어난 전기적 특성과 히드로겔의 구조적 장점을 가지고 새로운 나노 구조체를 만들었다. 연구팀은 이러한 물질을 통해서 수퍼커패시터와 글루코스를 감지할 수 있는 초 감응성의 바이오센서 등과 같은 고성능의 전기화학 소자를 만들 수 있는 재료과학적 기초를 다지게 되었다.

히드로겔은 3차원의 폴리머 그물 구조망을 가지고 있어서 많은 양의 물을 함유할 수 있으며, 그 조직은 마치 생체 조직과 흡사하다. 대부분의 히드로겔은 비전도성 폴리머 물질이다. 이로 인해서 그 동안 전기 소자로 활용되는 데에는 어려움이 있었다. 연구팀은 이번에 피틴산(phytic acid)을 이용하여 폴리아닐린과 히드로겔을 결합하는 데 성공했다. 피틴산은 우수한 이온성 전도체이다. 폴리아닐린과 히드로겔의 반응 과정에 도펀트 역할을 하는 동시에 두 물질이 교차 결합하는 매개체 역할을 하고 있다.

히드로겔과 폴리아닐린이 합성되는 과정에 피틴산은 단량체인 아닐린을 폴리머로 만들어 주는 역할을 하는 동시에 중합 반응 과정을 매우 빠르게 촉진시키는 역할을 한다고 연구팀은 밝혔다. 이는 전형적인 겔화 시간이 3분 정도에 이르는 것에 비해서 이번 중합 시간은 수초 안에 이루어진다는 사실을 통해 확인된다. 각각의 피틴산은 6개의 황 그룹을 포함하여 한꺼번에 여러 개의 폴리머가 동시에 반응하는 역할을 한다.

연구팀은 잉크젯 프린팅 기법과 스프레이 방식으로 전도성 히드로겔 패턴을 만들었다. 이를 통해서 대면적의 패턴을 간단하게 형성할 수 있어서 바이오센서, 마이크로수퍼커패시터 소자 등을 간단하게 만들 수 있게 되었다. 이는 이번 기술의 활용성이 높다는 것을 보여주는 것이다.

폴리아닐린 히드로겔은 매우 우수한 약 480 F/g 커패시턴스를 가지고 있다. 또한 이상적인 그물망 구조를 가지

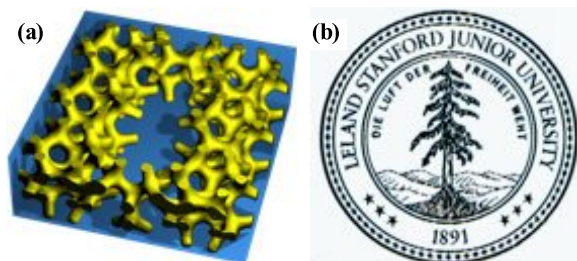


그림 5. (a) 폴리아닐린 히드로겔 구조체 (b) 폴리아닐린의 히드로겔을 이용한 잉크젯 프린팅 패턴.

고 있어서 에너지 저장소로서 많은 가능성을 내포하고 있다. 상업적인 탄소 소자가 약 100 F/g 커패시턴스를 가지고 있는 것에 비해서도 매우 높은 값을 가지고 있다. 연구팀은 또한 글루코스 산화효소(glucose oxidase, GO_x)를 이용하여 글루코스 센서를 만들어 그 성능을 평가했다. 히드로겔 센서는 약 0.3초의 반응성의 보였다. 이는 일반적인 글루코스 센서의 반응속도가 20초 정도인 것에 비해 볼 때 매우 빠른 속도이다.

연구팀은 전도성 폴리머에 기반을 둔 새로운 히드로겔 소자를 활용하여 다양한 소자를 개발하고자 지속적인 연구를 진행하고 있으며, 향후 고성능 리튬배터리 분야 및 전기변색소자, 뉴런 전극, 전자 피부 등 다양한 분야에 이번 기술을 접목시키고자 하고 있다고 밝혔다.

<http://nanotechweb.org/cws/article/tech/49992>

적외선 광을 이용하는 탄소로만 이루어진 태양 전지

지구 표면에 도달하는 태양 에너지의 약 40%는 일반적인 실리콘 기반 태양 전지가 이용할 수 없는 근적외선 영역의 스펙트럼을 가지는 에너지이다. 그러나, MIT 연구원들에 의해 개발된 새로운 종류의 탄소로만 이루어진 태양 전지는 태양광 에너지 전체 영역을 이용하게 할 수 있도록 전통적인 실리콘 기반 전지와 새로운 탄소 전지 모두를 사용하고 있다. MIT 화학공학과 Charles와 Hilda Roddey 교수, *Advanced Materials* 지에 최근 새로운 소자에 대한 논문의 저자인 Michael Strano는 이 전지가 기본적으로 새로운 종류의 광전 전지라고 말했다.

이 새로운 전지는 두 가지 색다른 탄소 형태인 탄소 나노튜브와 C₆₀으로만 들어진다. 이것은 최초로 탄소로 모두 이루어진 광전 전지라고 Strano는 말했다. 새로운 태양

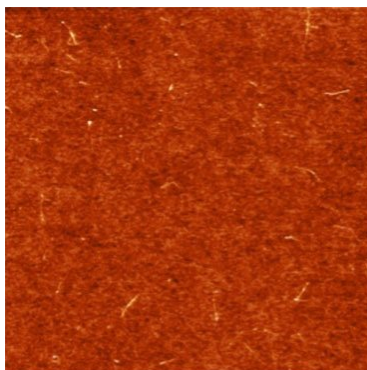


그림 6. 실리콘 표면 위에 증착된 단일벽 탄소 나노튜브 층을 촬영한 AFM 사진(MIT 연구팀에 의해 개발된 새로운 형태의 태양 전지를 제조하는 첫 번째 단계에서, 개별의 나노튜브 이미지가 관찰된다).

전지를 작동시키기 위해, 나노튜브들은 매우 순수해야 하고 균일한 형태여야 한다. 단일 벽 형태는 나노튜브의 2 가지 가능한 대칭적인 구성 중의 하나이다.

다른 그룹도 탄소 나노튜브를 이용하여 광전(PV) 전지를 만들었지만, 태양광을 흡수했을 때, 효율적으로 전자들을 수집하고 단지 나노튜브를 붙잡기 위해 폴리머 층을 이용하여 제작되었다. 그러나, 이 결합은 제조 공정에 부가적인 단계들을 만들고 공기에 노출될 때 성능 저하를 막기 위해 외부 코팅들이 필요하다. 이에 비해 이 새로운 탄소 PV 전지는 공기에 안정한 것으로 나타났다.

탄소 기반 전지는 근 적외선 영역에서 태양광을 포획하는데 매우 효과적이다. 이 물질이 가시광에 투명하기 때문에 이 전지는 태양광 에너지 대부분을 이용할 수 있는 텐덤(tandem) 소자를 제조하는데 일반적인 태양전지 상에 부착될 수 있다. 탄소 전지는 계속 개선될 것이다. 지금까지의 소자는 약 0.1%의 에너지 전환 효율을 가진다. 그러나, 이 시스템은 더 많은 연구와 미세한 조정이 필요하다. 연구원들은 매우 효율적인 근적외선 태양전지를 제조하는 방법을 개발하고 있다.

이 새로운 시스템은 나노크기 물질 층들을 이용하기 때문에 이 전지를 생산하는데 상대적으로 적은 양의 고순도 탄소가 요구되고 이로써 제작된 전지는 매우 가볍게 된다. 탄소 나노튜브에 관한 실제 장점들 중 하나는 나노튜브의 흡수가 매우 커 많은 광을 흡수하는데 적은 양의 물질만이 필요하다는 것이다.

일반적으로, 새로운 태양전지 물질이 연구되었을 때, 이 소자는 매우 비효율적이었다. 연구원들은 현재 이 비효율성을 줄이는 방법을 꾸준히 찾고 있다. 비효율성의 원인들은 이미 확인되었거나 확인 중이다. 예를 들어, 과학자들은 이미 탄소 나노튜브의 이질성 혼합이 동질성 물질에 비해 훨씬 더 비효율적이고, 단일벽과 다중벽 나노튜브의 혼합을 가진 물질은 때때로 이 물질로 이루어진 소자가 전혀 작동하지 않을 정도로 매우 비효율적임을 확인하였다.

MIT 연구원들이 지금 하고 있는 연구는 제조하고 있는 물질 층의 정확한 모양과 두께를 매우 정확히 조절하는 것이다. 연구팀은 이 시스템을 향상시키는 방법을 찾기 위해 다른 연구원들의 합류를 원하고 있다. 그러나 Strano는 태양 스펙트럼의 근적외선 부분이 일반 태양전지에 의해 현재 전체적으로 이용되지 않기 때문에 이 영역에서 작동하는 낮은 효율 전지가 단가가 낮아 가치가 있을 것으로 믿고 있다.

<http://www.nanowerk.com/news/newsid=25678.php>

전하 이동도를 높이기 위한 반도체 결합

폴리머는 효율적인 전하 이동을 위한 전파 경로를 제공하는 균일한 층으로 형성된다. 높은 전하 이동도를 유지하는 적당한 분자들 사이의 중복으로 고품질 결정 물질을 형성한다. *Journal of Polymer Science: Polymer Physics*에 게재된 연구에서 연구원들은 유기 전자소자의 반도체인 폴리머와 작은 분자들 모두의 장점을 결합하여 전하 이동을 획기적으로 향상시킬 수 있다는 것을 보여주고 있다.

결정 경계에서 나타나는 트랩(trap)들은 전하 이동을 위한 한계로써 작용한다. 박막의 최종 지형에 걸쳐 조절하여 이 트랩의 효과를 최소화하고 전하 이동을 최대화할 수 있다. 여기서 핵심은 상대적인 농도, 용매, 증착 방법 등 적당한 경계 조건들을 이용하여 적절히 혼합하고 가공하면 두 가지 종류 물질의 장점들을 이용할 수 있다는 것이다. 연구원들은 작은 양의 결정 물질만이 반도체 박막의 전하 이동도를 현격히 향상시킬 수 있다는 것을 보였다.

이 연구에서, 연구원들은 poly(3-hexylthiophene)(P3HT), 공액 폴리머, 알킬 치환 bisphenyl-bithiophene[phenylene-thiophene-thiophene-phenylene(PTTP)], 작은 공액 분자들을 섞었다. 이 결과는 물질의 전자와 구조 특성 모두를 알 수 있도록 광학 현미경(OM), 원자힘 현미경(AFM), 켈빈 탐침힘 현미경(KPFM)을 이용하여 연구했다.

연구원들은 PTTP의 농도가 이 폴리머 내에서 높게 나누어진 전파 경로들을 만들기 충분하지만 상분리가 유도되지 않을 농도를 찾아야 했기 때문에 피크(peak) 성능 농도를 찾는 문제에 직면했다. 여기서, 최상의 결과는 3 내지 5% PTTP 농도를 가지고 얻을 수 있었다.

논문에서 연구원들은 이 혼합물의 전기 특성을 연구하고 어떻게 이 혼합이 상대적인 농도에 따라 변하는지 연구했지만 이 접근방법은 기계적에서 광학적으로 확장하는 넓은 영역의 특성을 연구하기 위한 원리로 이용될 수 있었다. 물질의 작은 양은 큰 특성 변화를 이끌



그림 7. 3% PTTP 농도에서 발견된 가지 모양 구조 사진(화살표).

수 있다. 이는 성능이 좋고 비싼 물질을 적은 양만 이용하여 값싼 물질의 특성을 조절할 수 있다는 것을 보여주었다.

예비 연구에서 자주 일어나는 것처럼, 하나의 발견은 많은 질문들을 야기한다. 왜 가장 빠른 이동도는 작은 분자 특정 퍼센트에서 얻어지는가? 불규칙성은 혼합에서 전하 이동을 향상시키는데 이용될 수 있다는 아이디어는 전기 특성이 지형적인 특성을 가지고 강하게 엮여 있는 것이다. 특이한 특성을 전달하는 혼합 분자들은 다기능 물질을 향상시키는 토대를 마련할 것이다.

<<http://www.materialsvIEWS.com/combining-semiconductor-s-increasing-charge-mobility/>>

박막 유기 반도체를 이용하여 개발된 스핀트로닉스 소자

유타 대학 과학자들은 기본적으로 플라스틱 페인트인 스핀트로닉스 유기 박막 반도체를 기반으로 과학적, 소비자 이용을 위한 저가, 고 정밀 자기장 센서를 개발했다. 이 새로운 종류의 자기 공명 자력계는 열에 강하고 성능 저하가 없으며 실온에서 작동하며 교정이 전혀 필요 없다고 *Nature Communications*에 최근 보고되었다. 자기 감지 박막은 MEH-PPV로 알려진 유기 반도체 폴리머이다. 이 소자는 굉장히 싼 오렌지 색 전기 전도, 자기장 감지 플라스틱 페인트이다. 연구원들은 일반 페인트 방울만큼 작은 플라스틱 페인트 한 방울로 매우 정밀하게 자기장을 측정했다.

이 오렌지 소자는 겨우 5 × 5 mm 크기이며 자기장을

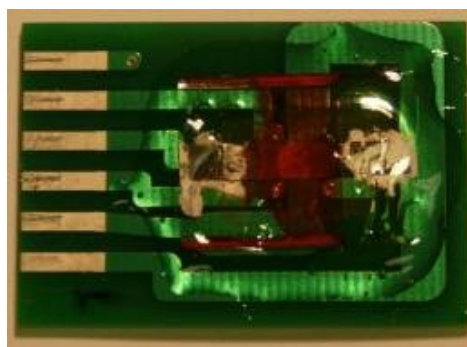


그림 8. 유타 대학에서 개발된 저가이며 고정밀성을 가진 스핀트로닉스 자기장 센서의 사진(프린트된 회로 보드 상에서 전체 소자는 0.8 × 1.2 in로 측정되었다. 그러나 실제로 자기장을 감지하는 부분은 붉은 오렌지 색 박막 반도체 부분이다).

실제 측정하는 부분은 겨우 $1 \times 1 \text{ mm}$ 이다. 이 오렌지 반도체 페인트는 약 $20 \times 30 \text{ mm}$ 크기인 회로 보드 상에 마운트된 얇은 유리 기판 상에 증착된다. 유타 대학 물리학과 교수이며 신 물질 연구 과학과 공학 센터의 주 발명자들 중 하나인 Brian Saam 교수는 이 새로운 자력계는 현실 세계 과학 기술 응용들의 주인공으로써 활약할 것으로 보았다. 물리학자 Christoph Boehme는 특허가 출원된 이 센서를 상용화시키기 위해 스핀오프(spinoff) 회사를 만들 계획이다. 이 연구에서, 연구원들은 절대 자기장을 측정하는 것이 많은 과학적 기술적 응용들에 중요하다고 강조했다.

소비 제품으로 사용하기 위해 어떤 일이 일어날 지 예상하기 어렵지만 실존하고 더 비싼 자기장 센서는 일상생활에서 사용하고 있는 전화기, 하드 드라이브, 항법 소자, 문 열림 장치, 많은 종류의 전자 제품 등에서 사용되고 있다. 그러나, 일반인들은 이 센서들을 사용하는지도 모르고 있다. 이미 많은 센서들이 상용화되어 있지만, 안정적이고 정확하지 않고 제조하는데 너무 비싸다. Boehme은 이 소자가 만약 이 소자를 더 빠르게 만들 다른 새로운 기술들과 결합될 수 있다면 3년 이내에 시장에 선보일 수 있을 것으로 믿고 있다. 자기장을 읽는데 수 초가 걸리는 속도가 이 소자의 단점이다.

이 센서는 데이터가 전자 혹은 원자 핵의 전하와 원자 이하의 크기를 갖는 입자의 스핀으로 알려진 것 모두에서 전자적으로 저장된 스핀트로닉스라고 알려진 과학 영역을 기반으로 만들어졌다. 간단하게, 스핀은 전자 혹은 핵 내에서 위와 아래를 가리키는 작은 자석과 같이 입자를 행동하게 한다. 전자소자에서 전하를 가지지 않았을 때 0, 전하를 가질 때 1인 것과 같이 아래는 0을 표시하고 위는 1을 표시한다. 스핀트로닉스는 전하만을 이용하는 전자소자들보다 유용한 스핀과 전하를 이용하여 더 많은 정보를 저장한다.

새로운 자기장 센서 페인트는 자기장의 유무에 스핀을 평행하거나 평행하지 않게 배열하는 음의 전하를 띤 전자와 양의 전하를 띤 홀을 포함한다. 그러나 만약 특정한 주파수의 라디오 파가 반도체 페인트에 인가된다면, 전류가 새로운 소자에 인가된다. 소자 내 전기 콘택들은 연구원들

이 주파수에서 점진적으로 변화시키는 라디오 파로 플라스틱 페인트를 충격을 주기 위한 작은 방송 안테나의 역할을 한다. 만약 자기장이 존재한다면, 폴리머 페인트 내 스핀들은 라디오 파의 주파수가 자기장과 일치할 때, 뒤집힐 것이다. 페인트 내 스핀의 변화는 전류로 전환되고 이후 자기장 강도를 결정하도록 기록된다. 페인트가 유기 폴리머이기 때문에, 센서는 유기 스핀트로닉스 소자로 알려졌다. 새로운 자력계는 지구 자기력보다 천 배 약한 영역에서 만 배 강한 영역까지의 자기장을 감지할 수 있다.

새로운 자력계는 SQUIDS로 알려진 소자에 의해 현재 측정되는 매우 약한 자기장을 측정할 수 없다. 일반적인 자기 공조 소자는 매우 잘 측정하지만, 의료 MRI 기기에서 이용되는 것처럼 덩치가 매우 크고 비싸다. 그래서 이 새로운 자력계는 강한 자기장을 측정할 수 있고 저가이며 소형이라는 장점을 가지고 이런 기기들을 대체할 수 있을 것이다. 그러나, 새로운 소자의 주된 사용은 실존 소자가 동작하지 않는 중간 크기의 자기장을 위한 것이다.

새로운 센서는 유기 자기 공명 자력계 혹은 OMRM로 알려졌다. 이 센서의 단점은 자기장을 감지하기 위해 수 초가 걸리는 느린 속도이다. 연구원들은 유기 자기 저항 센서 혹은 OMAR로 알려진 비슷하게 개발된 자력계 기술을 이용하여 이 소자와 결합시키기를 원하고 있다. OMAR은 100 배 더 빠르지만 교정이 필요하며, 매우 정교하지 못하고 중간 크기 자기장을 겨우 측정하고 온도 변화와 물질 성능 저하에 민감하다. 새로운 실험은 어떻게 1 mm^2 감지 영역 이하로 만들고 이 소자를 이용하여 정확하게 자기장을 측정하는가를 평가할 것이다. 연구원들의 목표는 미세 제조 기술을 이용하여 백만 배 더 작게 만드는 것이다.

<<http://phys.org/news/2012-06-dirt-cheap-magnetic-field-sensor.html>>

본 기술 뉴스는 KISTI 미리만의 글로벌동향브리핑(GB)에서 발췌하였습니다.
(동아대학교 박종승, e-mail: jongpark@dau.ac.kr)