

## 원거리에서 물을 정화시키는 나노와이어 LED

오하이오 주립대학(Ohio State University)의 마이어스 교수(Roberto Myers) 연구진은 가볍고 유연한 금속 호일 위에 발광 다이오드(light-emitting diode, LED)를 구현하였다. 이 휴대용 소자는 자외선을 방출하는데, 식수를 정화하거나 아니면 의료용 장비들을 소독하는데 이용될 수 있다.

이미 자외선은 군대, 구호 단체, 그리고 회사에서 다양한 용도로 사용이 되고 있다. 하지만 과거 자외선 수는 램프의 경우 무겁고 부피가 커서 들고 다니기 용이하지 않거나, 인체에 해로운 수은을 포함하고 있었다. 이런 문제가 없는 LED의 경우에도 실험실 단위에서 구현하는 것은 가능하였지만 대량 생산을 하는데 어려움이 있었다. 오하이오 주립대학의 연구진은 나노와이어를 사용하여 가볍고 생산비용이 적으며 대량생산이 가능한 LED를 성공적으로 만들었다.

본 연구결과는 "Nanowire LEDs grown directly on flexible metal foil"라는 제목으로 *Applied Physics Letters*에 게재되었다.

<B. J. May et al., *Appl. Phys. Lett.*, **108**, 141103 (2016)>

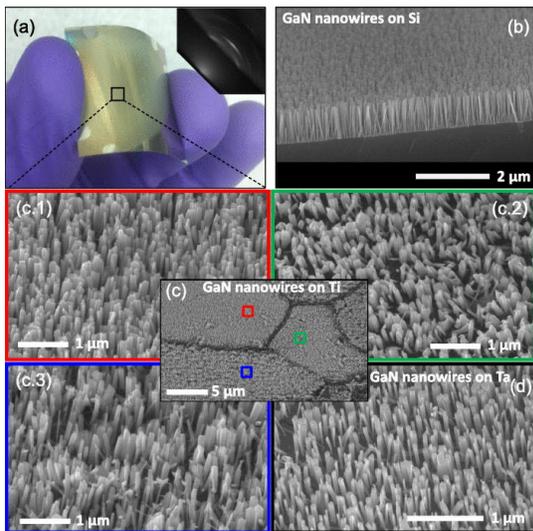


그림 1. (a) 유연한 Ti 포일 위에 GaN 나노와이어, (b-d) Si 단일 결정, Ti 호일의 다른 grain, 그리고 Ta 호일 위에서의 GaN 나노와이어 SEM 이미지.

## 전자 소자 속의 열을 분산시킬 수 있는 새로운 방법

작고 빠른 컴퓨터 칩, 태양 패널, 레이저 등의 전자소자를 개발하는데 있어서 반도체 내에서 열의 흐름을 조절하는 것은 매우 중요한 일이다.

캘리포니아 주립대학 리버사이드 캠퍼스(University of California, California, Riverside)의 발란딘 교수(Alexander Balandin) 연구진은 갈륨비소(GaAs)로 반도체 특성을 보이는 나노와이어를 합성하고, 브릴루앙-만델스탐 광 산란 분광법(Brillouin-Mandelstam light scattering spectroscopy, BMS)이라는 이미징 기술을 사용하여 결정성 구조 내에서 포논(acoustic phonon)의 이동을 연구하였다. 연구진은 나노 구조의 크기와 모양을 바꿈으로써 나노 구조 내의 포논의 분산 관계(dispersion relation)를 조절할 수 있었다.

이 결과들을 바탕으로 나노 스케일에서 포논을 더욱 효과적으로 조절할 수 있을 것이라고 연구진은 믿고 있으며, 이런 결과들은 미래의 나노 전기소자, 열전 소자, 그리고 스핀트로닉 소자 관련 연구에도 큰 도움이 될 것이라고 고려되고 있다.

본 연구결과는 "Direct observation of confined acoustic phonon polarization branches in free-standing semiconductor

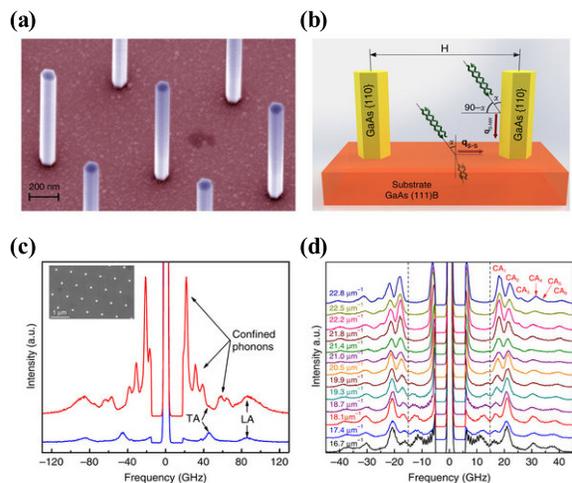


그림 2. 프리스탠딩 GaAs 나노와이어와 포논 스펙트럼.

nanowires"라는 제목으로 *Nature Communications*에 게재되었다.  
 <F. Kargar et al., *Nat. Commun.*, 7, 13400 (2016)>

## 나노 가둠(Nano-Confinement) 현상을 이용한 고신축성 고분자 반도체 필름

스탠포드 대학교(Stanford University)의 바오 교수(Zhenan Bao) 연구진은 본래 시료 크기의 두 배 이상만큼 신장되더라도 비결정 실리콘과 비교될만한 전도도를 유지하는 고신축성 고분자 반도체 필름을 제작하는데 성공하였다.

최근 웨어러블 전기 디바이스에 대한 관심이 많아지면서 연구자들은 구부리는 것 이외에도 신축성까지 지니고 있는 트랜지스터를 개발하기 위해서 노력해오고 있었다. 하지만 실리콘(Si)이 아닌 고분자를 사용하더라도 신축성을 늘리게 되면 일반적으로 전도도가 감소하는 문제가 있었다.

스탠포드 대학교 연구진은 고분자가 나노 스케일의 공간으로 제한될 때 고분자의 역학(dynamics)이 빨라지면서 공액(conjugated) 고분자의 탄소계수가 작아지고 균열이 일어나는 시점이 늦추어진다는 점에 착안을 하였다. 연구진은 DPP-TT (poly(2,5-bis(2-octyldodecyl)-3,6-di(thiophen-2-yl)diketopyrrolo[3,4-c]pyrrole-1,4-dione-alt-thieno[3,2-b]thiophen)라는 전도성 고분자를 SEBS(polystyrene-*block*-poly(ethylene-*ran*-butylene)-*block*-polystyrene)라는 블록 공중합체 고무(elastomer) 안에 넣어 나노 미터 두께의 필름을 구현하였다. 연구진은 굽히거나 잡아당기더라도 전도도가 큰 변화 없이 유지되는 것을 확

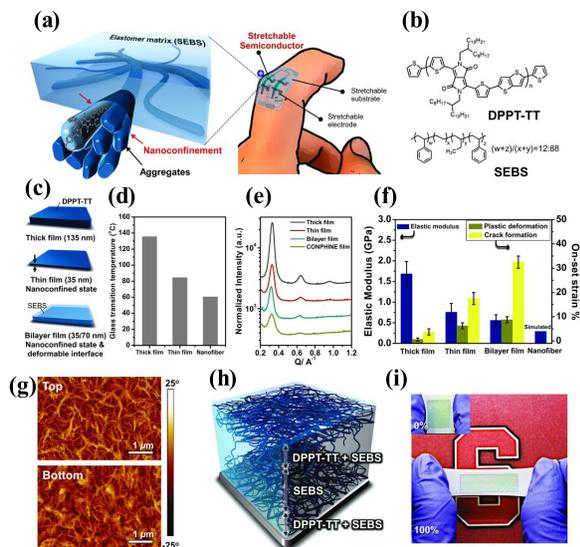


그림 3. (a) 반도체성 고분자가 고무 원형(matrix) 안에 구현된 필름의 신축성을 나타내는 그림, (b) DPPT-TT 및 SEBS 화학구조, (c) 실험에 사용된 세 개의 필름, (d) 필름 두께에 따른 유리전이온도의 변화, (e) X-ray 결과, (f) 필름의 기계적 물성, (g) 필름 윗면과 아랫면의 AFM 결과, (h) 나노 필름의 3차원 구조를 나타내는 그림, (i) 실제 100% 변형도일 때 필름 사진.

인할 수 있었고 여러 번 실험을 반복하더라도 금이 가지 않는 뛰어난 기계적인 물성을 확인하였다.

연구진이 사용한 방법은 실리콘처럼 고온 공정이 필요하지 않고 저렴한 방식을 통해서 구현 가능하다는 장점을 지니고 있다.

본 연구결과는 "Highly stretchable polymer semiconductor films through the nanoconfinement effect"라는 제목으로 *Science*에 게재되었다.

<J. Xu et al., *Science*, 355, 59 (2017)>

## 나노 다공성 폴리에틸렌 섬유를 통한 인체 냉각(Radiative Human Body Cooling)

스탠포드 대학교(Stanford University)의 쿠이 교수(Yi Cui) 연구진은 인체에서 발생하는 적외선을 효과적으로 방출하여 냉각 효과를 보이는 폴리에틸렌(PE) 나노 다공성 섬유를 구현하였다.

에너지 소비로 야기되는 환경 문제에 대한 대처 방안으로서 친환경 재생 에너지를 개발하는 것 이외에도 다른 한편에서는 에너지 소비를 줄이려는 노력을 기울이고 있다. 특히 냉난방은 총 에너지 소비량에서 적지 않은 부분을 차지하고 있는 분야인데, 최근 건물 전체보다 개별적인 인체에 대한 열 관리(thermal management)를 통해 에너지 효율을 증가할 수 있다는 측면을 사람들이 주목하고 있다.

스탠포드 대학교 연구진은 적외선은 통과시키면서 가시광선은 흡수하는 폴리에틸렌(PE)을 원재료로서 사용하였고, 이를 50-1,000 nm의 지름을 가지는 다공성 형태로 구현을 하여 일반 직물에 요구되는 공기 투과성과 기계적 강도를 얻을 수 있었다. 이 재질을 피부에 실험을 하였을 때 면 재질의 옷에 비하여 피부의 온도가 2.7 °C 가량 낮게 유지되는 것을 확인할 수 있었다.

이 방법은 추가적인 전원 없이 동작을 하고 전선을 연결하거나 전자 기기와 연결을 하지 않아도 냉각 역할을 할 수 있다는 점에서 장점을 가지고 있다.

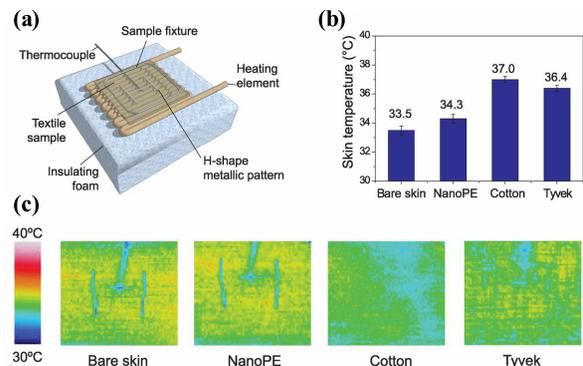


그림 4. (a) 나노 다공성 PE의 열 관리 측정 실험 그림, (b) 직물 재질에 따른 피부의 온도, (c) 직물 재질에 따른 열 이미징 결과.

본 연구결과는 "Radiative human body cooling by nanoporous polyethylene textile"라는 제목으로 *Science*에 게재되었다.

<P.-C. Hsu et al., *Science*, **353**, 1019 (2016) >

## PEDOT:PSS/PANI-CSA 고분자 다층 박막 구조를 통한 열전 성능의 개선

광주과학기술원의 조지영 교수 연구진은 고분자 다층박막 구조(layer-by-layer, LBL)를 이용하여 제벡 계수(Seebeck coefficient)가 감소하지 않도록 조절하고 동시에 전기 전도도를 증가시키는데 성공하여 높은 효율의 열전 소자를 구현하였다.

열전 소자는 폐열회수(waste heat recovery)를 가능하게 해주는 기기로서 여러 방면에서 에너지 효율을 높여줄 것이라고 예상되고 있다. 유연성, 무해성, 낮은 열전도도 등의 측면에서 전도성 고분자를 이용한 열전 소자에 많은 사람들이 관심을 가지고 있지만, 상대적으로 낮은 전기 전도도 때문에 무기 물질을 사용한 열전 소자에 비하여 소자의 효율이 높지 않다는 문제를 가지고 있었다. 일반적으로 전기 전도도를 증가시키게 되면 제벡 계수 등의 다른 계수들에 영향을 주게 되고, 이런 계수들 간의 상호 의존도 때문에 열전 소자의 효율을 올리는 것은 용이하지 않았다.

광주과학기술원 연구팀은 LBL 방법을 통해서 각 층의 두께가 20 nm 정도의 PEDOT:PSS와 PANI-CSA 다층 구조를 구현하였다. 이 때 고분자 주쇄가 당겨지면서 단일 PEDOT:PSS 층에 비하여 전기 전도도가 1.3배까지 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 비록 PANI-CSA에서 정공이 PEDOT:PSS로 전하 이동이 일어나지만, 상대적으로 제벡 계수의 변화는 작은 것을 확인할 수 있었다. 결과적으로 PEDOT:PSS 단일층에 비해서 이 열전소

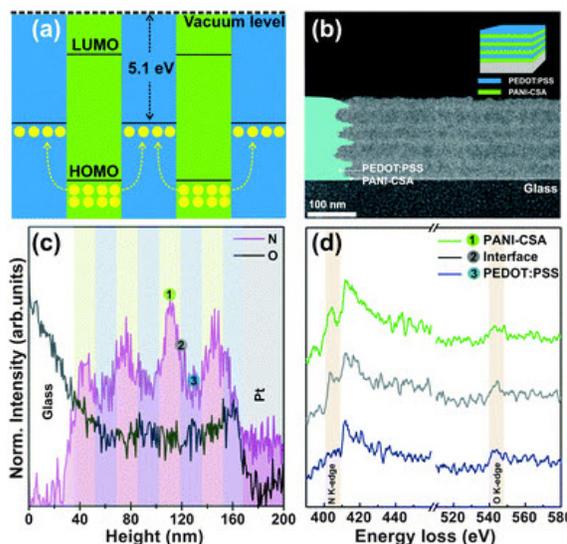


그림 5. (a) PEDOT:PSS/PANI-CSA 사이에 전하 이동(charge transfer)을 나타내는 그림, (b) 다층 필름의 단면 TEM 결과, (c, d) 다층 필름의 EELS 및 ELNES 결과.

자의 최종 전력인자(power factor)는 약 2배 가량 개선될 수 있었다.

본 연구결과는 "Enhanced thermoelectric performance of PEDOT:PSS/PANI-CSA polymer multilayer structures"라는 제목으로 *Energy & Environmental Science*에 게재되었다.

<H. Y. Lee et al., *Energy. Environ. Sci.*, **9**, 2806 (2016) >

본 기술 뉴스의 일부는 NDSL 해외과학기술동향 (<http://www.ndsl.kr>)의 기사를 참조하여 정리하였습니다.  
<김상원, email: sangwon\_kim@inha.ac.kr>