

| 뛰어난 소수성 표면(Super Repellant Surface)을 지닌 물질의 개발

미시간대(University of Michigan)의 연구자들이 미공군의 연구자들과 공동 연구를 통해 오일, 물, 알칼리 용액, 산, 심지어는 비뉴턴유체(non-newtonian fluid)에 저항성을 지니는 새로운 형태의 표면 물질을 만들어내는데 성공했다. *Journal of the American Chemical Society*지에 게재된 이번 논문에서, 연구자들은 자신들이 새롭게 만들어낸 물질과 이들이 다양한 액체에 대해 저항하는 여러 방법들에 대해 설명하고 있다.

연구자들이 개발한 물질은 두 가지 요인으로 작동한다. 이들 요인들은 각각 이들이 지닌 화학적 구조(chemical structure)와 물리적인 레이아웃(physical layout)을 의미한다. 이 물질들은 고분자(PDMS와 POSS)로 코팅되어 있는 매우 작은 강철 그물로 이루어져 있다. 이 독특한 패턴은 표면에 제한을 가하게 되고 표면에 달라붙는 성질을 제한하게 만들어준다. 또한, 고분자 비드들 사이의 작은 공기 주머니는 이 물질들이 표면 상에서 다른 부분들과 접촉하는 것을 막아주는 역할을 해 액체로 표면이 젖는 것을 막아주는 역할을 한다.

연구자들은 이 물질들에서 일어나는 표면상의 반발력(repellent)이 젖는 것과 관련된 이력현상(hysteresis)을 제한함으로써 발생한다고 설명했다. 이러한 현상으로 인해 영향을 받는 면적이 줄어들게 된다. 실용적인 의미에서 이러한 사실들은 액체가 접촉할 때 방울의 형태를 유지하면 할

수록, 더 적은 양이 표면에 결합한다는 것을 의미한다.

연구자들은 고분자들을 포함하고 있는 액체들에 반발하는, 특히 비뉴턴 유체에 반발하는 표면을 만드는 것이 어렵다는 사실을 알게 되었다. 이것은 그러한 물질들이 접촉과 동시에 형태가 변화하는 성질이 크기 때문이다. 따라서, 표면에 이런 유체들이 떨어졌을 때 이들의 형태가 변하는 것을 막아줄 수 있는 방법을 알아내는 것이 중요하다. 이 새로운 물질을 이용해, 연구자들은 이러한 액체들이 표면에 인접한 다른 쪽으로 퍼져나가는 것을 막을 수 있었다. 그러한 물질은 이들이 퍼져나가는 양에 제한을 주게 되며 따라서 액체 방울의 변형을 막아줄 수 있다.

연구자들은 또한 새로운 물질로 덮여 있는 표면에 작은 관을 통해 흐르는 여러 액체들을 통과시킴으로써 액체에 저항하는 그 물질의 성질을 입증할 수 있었다. 이 물질로 코팅된 알루미늄 판에 여러 산들을 접촉시킨 결과 이들이 화학적인 공격으로부터 표면을 보호할 수 있다는 사실이 입증되었다. 연구팀은 이에 대해 그러한 실험에서 이들이 지닌 강도는 표면에 물체들이 결합하는 것을 막아주는 것과 동일한 성질에서 비롯된다는 사실도 알게 되었다. 만약 산이 표면에 접촉하지 못한다면 산은 표면을 부식시킬 수 없을 것이다. 이에 대한 보다 자세한 연구 결과는 "Superomniphobic surfaces for effective chemical shielding", *J. Am. Chem. Soc.*, Article ASAP, DOI: 10.1021/ja310517s를 참고하기 바란다.

<Pan et al., *J. Am. Chem. Soc.*, **135**, 578 (2013),

DOI:10.1021/ja310517s>

| 놀라운 성능을 가진 나노안테나 어레이

미국 매사추세츠 공과대학(Massachusetts Institute of Technology)의 연구진은 실리콘 칩 위에 광학적 안테나의 대면적 어레이를 최초로 만들었다. 이 구조는 미리 정의된 정밀한 광 패턴을 가질 수 있고, 3차원 홀로그램 디스플레이와 첨단 의료 이미징 등과 같은 새로운 분야에 사용될 수 있다.

안테나는 라디오 및 텔레비전 전파를 전달하는데 오랫동안 사용되었지만, 과학자들은 이런 개념을 최근에 광 주파

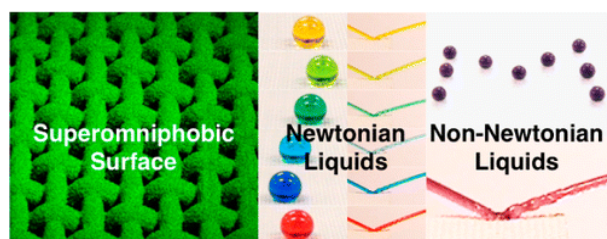


그림 1. 연구진이 새롭게 개발한 표면의 모습과 여기에 비뉴턴 액체와 뉴턴 액체를 적용시킨 모습.

수로 확대하기 시작했다. 모든 안테나는 그들의 구조를 따라서 전하를 진동시킴으로써 작동하는데, 이때 안테나의 크기가 전자기 방사선 파장의 공명 모드와 일치해야 한다. 광 주파수로 안테나가 작동하게 하기 위해서는 나노미터 크기 이하로 만들어져야 한다.

다양한 라디오 안테나를 연결하는 개념은 오랫동안 조사되었다. 안테나는 주어진 방향으로 라디오 전파의 방출을 향상시키기 위해서 위상으로 정렬된다. 또한 이 기술은 천문학에서 일상적으로 사용되고 있다. 다중 망원경을 사용할 때 전체 장치의 해상도를 향상시키기 위해서 위상으로 수집된다.

Michael Watts가 이끄는 이번 연구팀은 적외선 광학 분야로 이 개념을 확대시켰고, $0.5 \times 0.5 \text{ mm}$ 보다 더 적은 면적을 가진 단일 칩 위에 4000 개의 안테나를 집적시켜서 광학적 위상 어레이를 제조하는데 성공했다. 이것은 $9 \times 9 \mu\text{m}$ 크기를 가진 실리콘 위에 64×64 의 픽셀(pixel)을 가진 나노 안테나 장치이다. 모든 안테나는 고지수(high-index)의 강한 유전체 격자로 만들어지고, 동일한 전원으로 작동되면 복잡한 광 패턴을 만들기 위해서 위상으로 정렬된다. 연구진에 따르면, 이 연구결과는 실리콘 나노포토닉스 구성요소들의 결합 중에서 가장 큰 것이다. 연구진은 광이 어레이에서 방출되는 방향을 정확하게 제어할 수 있고 두 개의 크기로 방출되는 광 빔을 조정할 수 있다는 것을 보여주었다.

이번 연구진은 광 액침 노광(optical immersion lithography)과 같은 최신 장치를 사용해서 기존의 300 mm의 CMOS (complementary metal-oxide semiconductor) 제조 설비에서 위상 어레이(phased array)를 만들었다. 연구팀에 따르면, 이 어레이는 LIDAR과 간섭 측정(interferometry)과 같은 감지 분야에서 빛을 조정하는데 적용될 수 있다. 또한 이 어레이는 생물학적 조직과 같은 매체에 광 산란을 통한 이미징 관측에 사용될 수 있다. 이러한 이미징(imaging)은 주위 매

체에 의해 발생하는 뒤튕림을 보정하기 위해서 광 파장의 위상을 자동적으로 조절하는 “적응광학기술(adaptive optics)”을 이용한다. 이것은 광 빔의 정밀 위상 제어라고 불리고, 수많은 픽셀은 광학적 위상 어레이가 가진 두 개의 특성을 가진다. 이 연구는 레이저 빔을 조정하고 혈관 벽을 관찰하는 혈관 내의 수술에도 이용될 수 있다.

연구진은 이 어레이의 가장 흥미로운 적용 분야로 3차원 홀로그램 디스플레이를 꼽았다. 이 연구는 3차원 홀로그램 디스플레이 분야의 적용에 큰 잠재력을 가지고 있기 때문에 앞으로 많은 연구가 진행될 것이라고 연구진은 말했다. 이것은 이 어레이가 나노포토닉스 이미터(emitter)의 단일점 여기뿐만 아니라 방출된 광 파장의 크기와 위상에 대한 제어가 가능하기 때문이다. 이것은 온-칩(on-chip)으로 최초의 홀로그램을 만들 수 있게 할 것이다.

연구진은 어레이가 가시광선 파장에서 작동된다면 이러한 적용이 더 나은 결과를 가질 수 있을 것이라고 덧붙였다. 이것은 가시광선 파장이 근적외선 주파수보다 더 짧기 때문이다. 이것을 달성하기 위해서, 연구진은 추가적으로 어레이 픽셀 크기를 감소시키는 연구를 진행할 계획을 가지고 있다. 또한 실리콘이 스펙트럼의 가시광선 부분의 빛을 흡수하기 때문에 구조 속의 도파관을 실리콘 이외의 재료로 적용할 계획을 가지고 있다. 이 연구결과는 저널 Nature에 “Large-scale nanophotonic phased array”이라는 제목으로 게재되었다.

<Jie et al., Nature., 493, 195 (2013),

DOI:10.1038/nature11727>

더 밝은 LED를 만들 수 있게 하는 생체모방 기술

벨기에, 프랑스, 캐나다 연구진은 생체 모방 기술을 이용해서 더 밝은 LED를 만들 수 있는 새로운 방법을 개발했다.

반딧불의 반짝임은 원래의 성능보다 1.5배 더 뛰어난 광 발광 다이오드(LED)를 만드는데 영감을 주었다. 이번 연구진은 반딧불 랜턴(이성을 끌어들이기 위해서 곤충 배에 위치한 발광 기관)의 내부 구조를 조사했다. 연구진은 랜턴의 방출을 향상시킬 수 있는 예상치 못한 패턴을 확인했고, 자연의 구조를 닮은 LED 상부 층을 생성시키는데 적용했다. 상부 층은 55%까지 LED 광 추출을 증가시켰고, 이것은 더 적은 에너지를 사용하면서 밤에 환한 빛을 가지는데 도움을 줄 것이다. 이 연구결과는 저널 Optics Express에 게재되었다.

이 연구의 가장 중요한 측면은 자연을 주의 깊게 관찰함으로써 많은 것을 배울 수 있다는 것을 보여주는 것이라고

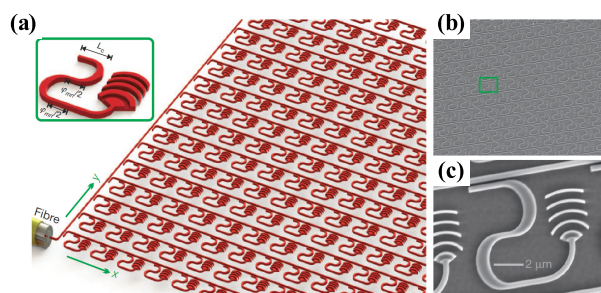


그림 2. 나노포토닉스 위상 어레이. (a) 64×64 나노포토닉스 위상 어레이. 광 섬유에 레이저 입력은 실리콘 도파관을 통해서 4,096개의 나노안테나 각각에게 동일하게 전달된다. (b) CMOS 설비로 제조된 64×64 시스템의 SEM 사진. (c) 나노포토닉스 위상 어레이의 한 픽셀을 찍은 SEM 이미지. 픽셀 크기는 $9 \mu\text{m} \times 9 \mu\text{m}$ 이다.

나뮈르 대학(University of Namur)의 연구진은 말했다. 이번 연구진은 딱정벌레와 나비 날개 등의 자연의 포토닉스 구조를 조사했다. 연구진은 파나마 남생이잎벌레에 대한 연구를 수행할 때, 군집을 이루고 있는 반딧불을 발견했고, 몇몇 표본을 더 상세한 조사를 위해서 가져왔다.

반딧불은 발광 세포(photocyte)이라고 불리는 특정 세포 속에서 일어나는 화학 반응을 통해서 빛을 생성시킨다. 빛은 큐티클이라고 불리는 곤충의 외골격의 일부에서 방출된다. 빛은 공기를 통해서 이동하는 것보다 훨씬 더 느리게 큐티클을 통해서 이동하고, 들쭉날쭉한 부분이 있다는 것은 빛의 일부가 랜턴의 후면으로 반사된다는 것을 의미하고 빛 방출은 감소된다. 그러나 일부 반딧불의 큐티클의 독특한 표면 형상은 내부 반사를 최소화하는데 도움을 줄 수 있고, 이것은 반딧불 암컷(또는 수컷)에게 더 많은 빛을 전달할 수 있게 한다는 것을 의미한다.

이번 연구진은 반딧불 랜턴의 복잡한 구조를 처음 관찰했고, 이런 구조가 LED 디자인을 어떻게 향상시킬 수 있는지를 제시했다. 주사 전자 현미경을 사용해서, 연구진은 반딧불 큐티클의 나노크기 리브(rib)와 들쭉날쭉한 구조를 확인했다. 연구진은 이런 구조가 광 투과에 어떤 영향을 끼치는지를 모델링하기 위해서 컴퓨터 시뮬레이션을 사용했고, 들쭉날쭉한 날카로운 부분에서 대부분의 빛이 발생한다는 것을 발견했다. 이 연구결과는 연구진이 가장 밝게 빛나는 모서리를 관찰했을 때 실험적으로 확인되었다.

이 구조는 공장의 지붕 형상과 닮았다. 팀 부분이 돌출되면 공장 지붕처럼 경사진 기울기를 가진다. 이런 돌출은 대략



그림 3. 효과적인 LED 코팅을 개발하는데 도움을 준 반딧불 표본.

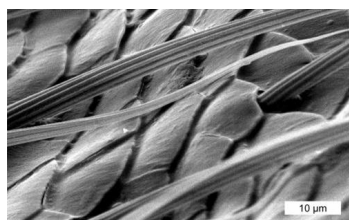


그림 4. 반딧불 랜턴에서 발견되는 들쭉날쭉한 구조를 보여주는 이미지.

3 μm 의 높이로 대략 10 μm 간격으로 반복된다. 더 작은 나노크기 구조를 만드는 것이 중요하지만, 연구진은 광 추출을 향상시킬 수 있는 효과적인 구조 크기를 발견했다.

LED와 같은 광 방출 장치들은 반딧불 랜턴처럼 동일한 내부 반사 문제를 가진다. 두 번째의 *Optics Express* 논문에서, 이번 연구진은 일반적인 질화 갈륨 LED의 상부에 들쭉날쭉

한 층을 생성시켰다. 연구진은 LED의 상부에 광 민감성 재료를 증착시켰고, 그 후에 삼각형의 공장-지붕 모양을 만들기 위해서 이 부분을 레이저로 노출시켰다. LED가 반딧불의 큐티클보다 더 느리게 빛을 전달하는 물질로 만들어졌기 때문에, 연구진은 광 추출을 최대화하기 위해서 5 μm 의 높이와 폭으로 돌출부의 크기를 조절했다. 이 기술은 간단한 프로세스로 구성되

었고, 코팅과 레이저 패턴 등의 몇 개의 단계로 기존의 LED의 성능을 향상시킬 수 있다. 이 연구결과는 저널 *Optics Express*에 "Improved light extraction in the bioluminescent lantern of a Photuris firefly(Lampyridae)"라는 제목과 "An optimal light-extracting overlayer, inspired by the lantern of a Photuris firefly, to improve the external efficiency of existing light-emitting diode"라는 제목으로 게재되었다.

<Bay et al., *Optics Express*, **21**, 764 (2013), DOI:10.1364/OE.21.000764>

<Bay et al., *Optics Express*, **21**, A179 (2013), DOI:10.1364/OE.21.00A179>

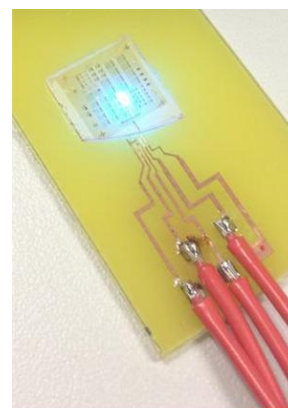


그림 5. 반딧불처럼 공장 지붕 패턴으로 코팅된 GaN LED. 생체 모방적 LED 코팅은 50% 이상까지 광 추출을 증가시켰다.

더 우수한 특성을 가진 적층형 폴리머 캡슐

호주 연구진은 새로운 형태의 약물 전달 도구를 만드는 데 성공했다. 기존의 구형 나노 전달 시스템보다 더 효율적인 이 나노캡슐은 세포와의 반응성도 뛰어난 것으로 확인되었다.

멜버른 대학(University of Melbourne)의 연구진은 잘 정의된 가로세로비를 가진 적층형 폴리머 캡슐을 최초로 개발했고, 이 캡슐이 생물학적 세포와 어떻게 상호작용하는지를 조사했다. 이 연구는 세포가 막대 형태의 캡슐보다 구체형상의 캡슐을 더 쉽게 흡수할 수 있다는 것을 보여주었다. 이 연구결과는 효율적인 약물 전달 구조를 만드는데 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

폴리머 캡슐은 적층 조립으로 제조되었고, 생물학적 세포 속에 약물을 전달하는데 사용되었다. 그러나 그들이 얼마나 효율적으로 작업을 수행할 수 있는지는 캡슐의 물리적 및

화학적 성질과 같은 다양한 요인에 의존하는데, 이것은 그들의 크기, 형상, 표면의 화학적 성질에 따라서 달라진다. 따라서 이러한 성질들을 제어하는 것은 중요한 연구 분야이다.

캡슐의 가로세로비는 매우 중요한 디자인 매개변수이고, 이런 비율을 조절함으로써 입자가 종양 세포를 손쉽게 관통할 수 있게 할 수 있다. 과학자들은 구형 금 입자(낮은 가로세로비를 가짐)가 금 나노막대(더 높은 가로세로비를 가짐)보다 더 쉽게 생물학적 세포를 관통할 수 있다는 것을 이미 증명했다. 동일한 의미로, 구형 poly(lactide-co-glycolide) 마이크로입자는 타원형 마이크로입자에 비해서 더 쉽게 생물학적 세포를 관통할 수 있다.

이번 연구팀은 티올화된 PMASH(poly(methacrylic acid))와 PVPON(poly(*N*-vinyl pyrrolidone))으로 만들어진 폴리머의 가로세로비를 변화시킴으로써 이런 캡슐의 변화가 생물학적 세포를 관통하는 능력에 어떤 영향을 끼치는지를 조사했다.

이 연구는 수소 결합을 통해서 실리카 템플릿 위에 폴리머 다층을 증착시킴으로써 시작되었다. 조립한 후에, PMASH 다층은 이황산염 결합(disulphide bond)을 형성하기 위해서 티올기(thiol group)의 산화로 안정화되었다. 그 후에 실리카 템플릿은 용해되었고, PVPON은 다층에서 벗어났는데, 이것은 단일 구성요소인 이황산염이 결합된 PMASH 캡슐을 생성시켰다. 여기서 중요한 것은 이런 캡슐이 성장된 템플릿의 형상을 그대로 가진다는 점이다. 캡슐의 가로세로비는 서로 다른 실리카 템플릿을 선택함으로써 조절될 수 있었다.

유동세포계수법(flow cytometry)과 이미징 유동세포계수법 기술을 사용해서, 이번 연구팀은 더 높은 가로세로비를 가진 캡슐이 더 낮은 가로세로비를 가진 것보다 훨씬 더 느리게 HeLa 세포 속에 들어간다는 것을 발견했다. 형광 현미경 분석으로 이것을 관찰할 수 있었다.

이 연구는 아직 초기 단계이고, 단지 약물 전달 캡슐이 세포 흡수에 얼마나 중요한지를 보여준다. 더 높은 가로세로비를 가진 캡슐이 더 느리게 세포 속을 관통한다는 사실

은 이런 구조의 생체분포(biodistribution)를 향상시키기 위한 기술 개발에 도움을 줄 수 있을 것이다. 연구진은 다른 폴리머 시스템과 서로 다른 생물학적 환경으로 그들의 실험을 확대할 예정이다. 향후 연구는 폭넓은 형상과 화학적 조성을 가진 캡슐을 개발하고 생체 내와 생체 외의 상호작용을 이해하는 것이 될 것이라고 연구진이 말했다. 이 연구결과는 저널 *ACS Nano*에 "Shape-dependant cellular processing of polyelectrolyte capsules"라는 제목으로 게재되었다.

<Shimoni *et al.*, *ACS Nano*, Article ASAP,

DOI:10.1021/nn3046117>

2차원 물질을 이용한 헤테로구조의 수직형 트랜지스터

차세대 전자소자 개발을 위해 그래핀에 대한 집중적인 관심이 쏟아지고 있지만, 밴드갭이 없는 물질 특성은 높은 on/off 비를 얻기 어렵다. 이를 극복하기 위해 폭이 좁은 형태를 제작하거나[GTB2012110507] 이중층 그래핀을 형성하고[GTB2011100572], 또는 수직형 트랜지스터 및 배리스터[GTB2012050587]와 같은 소자 구조들이 개발되고 있다. 하지만 on/off 비 향상과 함께 심각한 전류 밀도의 저하를 피할 수 없다.

미국 University of California 소속 Xiangfeng Duan 교수가 이끄는 연구진은 MoS₂ 및 그래핀을 조합하여 헤테로구조의 수직형 트랜지스터를 개발하고, 논리 소자로의 가능성을 확인했다. 연구 결과는 2012년 12월 16일자 *Nature Materials*지에 "Vertically stacked multi-heterostructures of layered materials for logic transistors and complementary inverters"란 제목으로 게재됐다.

연구진은 먼저 화학기상증착법(chemical vapor deposition, CVD)을 통해 합성된 단일층 그래핀을 산화실리콘 기판 위에 전사(transfer)하고, 마스크 및 산소 플라즈마 식각 공정을 통해 폭 10 μm, 길이 50 μm의 라인 패턴을 형성했다. 그리고 기계적 박리법을 통해 MoS₂ 조각을 올리고, 마지막으로 Ti(50 nm)/Au(50 nm)로 구성된 상부 전극을 증착했다. 하부 전극으로는 그래핀, 채널 영역으로는 MoS₂로 구성된 수직형 트랜지스터를 제작한 것이다. 그래핀은 정전기적 차폐 효과(electrostatic screening effect)가 약하기 때문에 실리콘 게이트에 인가된 전압은 그래핀을 통과하여 MoS₂ 에너지 밴드를 효과적으로 제어할 수 있다.

그림 8(a)는 제작된 수직형 전계효과트랜지스터(vertical field effect transistors, VFETs) 소자의 광학 이미지를 보여주는 것으로, 원자힘현미경(atomic force microscope, AFM)

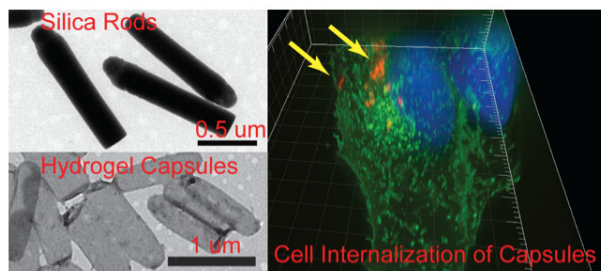


그림 6. (왼쪽) 실리카 막대와 수화젤 캡슐의 TEM 이미지. (오른쪽) 구형 캡슐의 HeLa 세포를 관통하는 모습을 보여주는 저속 촬영 현미경 이미지.

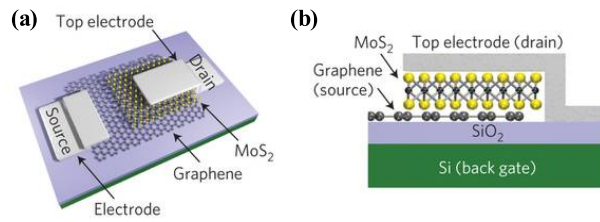


그림 7. 수직 적층형 그래핀-MoS₂-금속 구조의 전계효과 트랜지스터 (a) 소자 윤곽을 보여주는 3차원 모식도. (b) 상부 금속 전극, MoS₂ 반도체 채널, 그래핀 하부 전극으로 구성된 소자의 절단면 이미지.

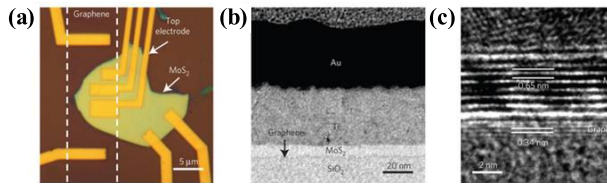


그림 8. 수직형 트랜지스터의 제작 및 구조 분석. (a) 수직형 트랜지스터 소자의 광학 이미지로 점선으로 표시된 그래핀 영역은 10 μm 폭의 크기를 지님. (b) 절단면 투과전자현미경 이미지. (c) 각 층간 계면을 보여주는 고해상도 투과전자현미경 이미지로, 단일층 그래핀의 경우 확인이 어렵기 때문에 다중층 그래핀을 활용하여 측정을 진행함.

을 통해 측정된 MoS₂ 두께는 30 nm로 나타났다. 그리고 소자 절단면에 대해 고해상도 투과전자현미경 측정 결과, 각 층간 계면이 물리적으로 잘 형성됐음을 확인할 수 있었다.

그림 9(a)는 제작된 수직형 트랜지스터 소자의 출력 특성을 보여주는 것으로, 드레인 전압과 전류 밀도 사이의 관계를 보여준다. 드레인 전압이 마이너스 영역에서 게이트 전압에 따른 전류 밀도 제어가 크게 나타남에 따라 통상적인 n 타입 특성의 MoS₂ 반도체 특성을 확인할 수 있었다. 게이트 전압에 따른 전류 밀도 변화를 살펴보면(그림 9(b) 참조), on/off 스위칭 비가 1,500 이상임을 알 수 있다. 또한 최적화 과정을 통해 최대 전류 밀도는 드레인 전압이 -1.0 V일 때 5,000 A/cm²로 나타남에 따라 통상적인 그래핀 소자에 비해 크게 증가했음을 알 수 있다.

연구진은 그래핀을 활용한 새로운 소자 구조를 제시하고,

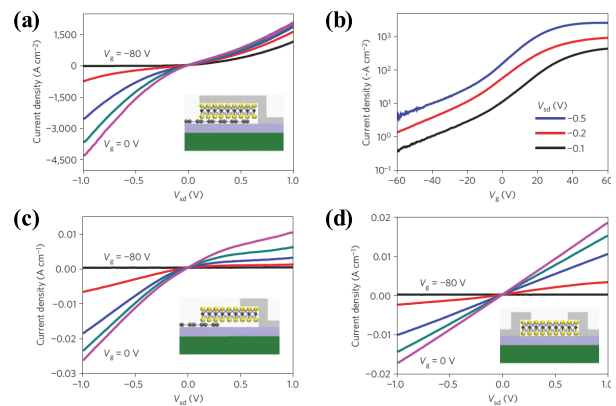


그림 9. 상온에서 측정된 소자의 전기적 특성. (a) 수직형 트랜지스터의 출력 특성 및 (b) transfer 특성. (c,d) 수평형 소자의 비교 특성.

on/off 스위칭 비 및 전류 밀도를 동시에 향상시키는데 성공했다. 트랜지스터 소자의 고유한 시간 지연 현상은 전류에 반비례한다. 즉 높은 전류 밀도는 짧은 시간 지연 현상이 나타나기 때문에 고속 소자 구동이 가능하다. 또한 수직형 트랜지스터의 경우 다중층으로 p 타입, n 타입을 동시에 구현하고, 동시에 게이트를 통한 전하 제어가 가능함에 따라 차세대 고성능 수직형 논리회로를 구성함에 있어 새로운 가능성을 제시한 것으로 평가된다. 이 연구결과는 저널 *Nature Materials*에 “Vertically stacked multi-heterostructures of layered materials for logic transistors and complementary inverters”라는 제목으로 게재되었다.

<Yu et al., *Nature Materials*., Article ASAP,

DOI:10.1038/nmat3518>

본 기술뉴스는 KISTI 미리안의 글로벌동향브리핑(<http://mirian.kisti.re.kr>)에서 발췌, 정리하였습니다.

<백경열, e-mail: baek@kisti.re.kr>