

단백질을 기반으로 하는 멤리스터 나노소자

멤리스터는 나노전자메모리소자, 로직소자, 신경형 컴퓨터 시스템 등에서 활용될 수 있는 잠재적인 가능성을 가지고 있으면 최근 들어 많은 주목을 받고 있다. Hewlett Packard의 R. Stanley Williams 박사 연구팀이 최초로 고상의 이산화 티탄 박막을 기반으로 하는 멤리스터 소자를 개발하여 Nanotechnology에 “The switching location of a bipolar memristor: chemical, thermal and structural mapping”라는 제목으로 발표했다.

과학자들은 지금까지 금속산화물, 칼코자나이드(chalcogenides), 비정질 실리콘, 탄소 및 폴리머 나노입자 복합체와 같은 다양한 재료들을 이용하여 멤리스터 현상을 연구해왔다. 지금까지 풀리지 않은 의문은 단백질과 같은 천연 바이오물질이 전달 접합(transport junction)을 가진 고상 소자 제작에 사용될 수 있는가이다. 싱가포르의 연구팀은 이번에 바이폴라 멤리스터 나노소자를 만들 수 있는 단백질에 대해 소개하고 있다. 이번 연구는 천연 바이오물질을 활용하여 고상의 바이오전자 소자를 만들 수 있다는 새로운 가능성을 보여주고 있다. “멤리스터에 대한 이전 연구는 합성된 무기물/유기물 물질에 기반을 두었다. 그래서 우리는 천연 재료를 기반으로 하는 멤리스터를 만드는 것이 가능한지에 대한 의문을 가졌다.”고 난양대학(Nanyang University) 재료과학부의 Xiaodong Chen 교수는 말했다. 또한 “생명체의 많은 활동은 메모리성의 특성을 보여주고 있으며 많은 연구가 컴퓨팅 부분을 담당하는 바이오분자에 집중되어있다. 따라서 천연 바이오물질은 전자 멤리스터로서 사용될 수 있는 잠재성을 가지고 있다.”고 말했다. Chen 교수와 그의 연구팀은 최초로 단백질을 기반으로 하는 바이폴라 멤리스터 나노소자에 대한 연구결과를 Small을 통해 발표했다. 연구팀은 온-와이어 리소그래피(on-wire lithography, OWL)기술로 만들어진 나노갭에 페리틴(ferritin) 분자들을 화학물 고정화기술을 통해 형성하였다. 페리틴은 생체 내에 존재하는 철 결합 단백질로 철을 저장하는 세포 내 단백질이다. “프로그램이 되는 저항성 스위칭은 페리틴의 중심에서 작용하는 전기화학적 과정으로 인해 가능해진다.”고 Chen 교수는 설명했다. 또한 “기억적인 저항을 가진

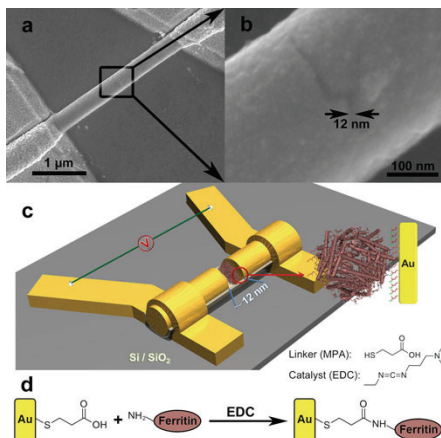


그림 1. 나노미터의 갭을 가진 OWL 방식으로 제조된 나노와이어를 이용하여 만들어진 소자의 주사전자현미경 사진(a,b), 페리틴 분자로 만들어진 소자의 개략도(c), 나노와이어의 갭의 양 측면에서 페리틴이 화학물 고정화기술로 연결되는 과정(d).

페리틴 나노소자는 읽기-쓰기-지우기 사이클 테스트를 거치는 비휘발성 메모리에 사용될 수 있다.”고 말했다. 이번 연구는 천연 바이오물질의 직접적인 사용 가능성을 보여주며 특별히 여러 기능성 나노회로에 사용될 수 있는 잠재적인 사용가능성을 보여주는 결과이다. 위 연구 결과는 Small에 “Protein-Based Memristive Nanodevices”라는 제목으로 발표되었다.

<Small, Published online, DOI: 10.1002/sml.201101494>

유기 태양전지의 성능과 나노크기 형상과의 상관관계

NPL(National Physical Laboratory)의 연구진은 유기 태양전지의 성능을 향상시킬 수 있는 새로운 기술을 개발했다. 연구진은 유기 태양전지의 작동 과정을 관찰할 수 있는 새로운 종류의 원자힘 현미경을 개발했고 이것을 이용해서 유기 태양전지의 성능이 3차원 나노크기 구조와 관련이 있다는 사실을 발견했다. 광기전 태양전지(photovoltaic solar cell)는 태양빛을 청정 전기로 빠르게 변환시킬 수 있는 옥상에 설치할 수 있어서 최근에 많은 관심을 받고 있다. 특히, 차세대 태양전지로 관심을 끌고 있는 유기 태양전지는 2016년까지 매년 187% 성장할 것으로 전망되고 있다. 아직까지 플렉시블 기판을 적용한 대면적 모듈에 비해서는 낮은 효율을 가지고 있지만 연속 인쇄공정 기술의 발전과 대면적 플렉서블 모듈의 급격한 효율성 향상으로 상용화에 대한 기대감이 점점 더 커지고 있다. 유기 광기전 태양전지는 유기(탄소 기반의) 전자장치를 사용하는 태양 전지의 일종으로 오늘날의 광기전 시스템을 대체할 수 있는 더 저렴하고 더 효율적이며 플렉서블한 대안물이다. 이 기술은 상업화되기 직전에 있지만 낮은 성능 등의 몇 가지 해결해야 할 문제점이 남아 있다. 최근에 형상과 성능이 서로 상관관계가 있다는 사실을 알고 있었지만 형태와 구조가 전기적 특성과 성능에 얼마나 많은 영향을 끼치는지를 정확하게 측정하는 것이 어려웠다.

이번 연구로 유기 태양전지의 작동 시에 적어도 20 나노미터 깊이의 표면 아래 및 표면 위의 구조적 및 전기적 정보를 얻을 수 있었다. 이 새로운 측정 방법은 형상과 광전류 생성을 동시에 측정하기 위해서 나노크기 탐침을 사용하는 광전도성 원자힘 현미경(photoconducting atomic force microscopy, pc-AFM)이라고 불리는 기술을 기반으로 했다. 이 기술은 유기 태양전지의 나노크기 형상과 이것의 성능 간에 직접적인 상관관계를 보여주었다. 이 연구결과는 유기 태양전지에 대한 이해를 향상시킬 수 있었는데, 이것은 유기 광기전력 물질의 나노크기 구조를 최적화

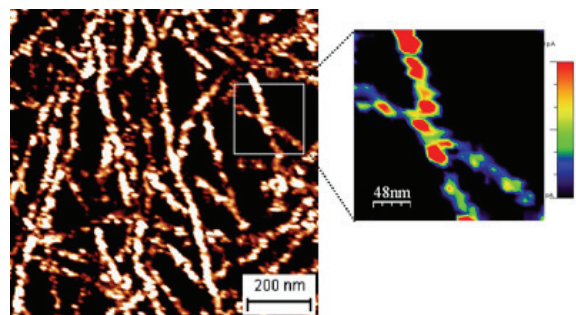


그림 2. 매끈한 폴리머-나노와이어 기반의 유기 태양전지의 광전도성 원자힘 현미경 사진.

함으로써 이런 제품의 효율성을 향상시킬 수 있을 것이다.

이 연구는 런던 임페리얼 단과대학(Imperial College London)과의 강한 연계를 통해서 물질과 장치 제조 전문 기술을 제공받았다. 이 연구 결과는 저널 Energy and Environmental Science에 “Surface and subsurface morphology of operating nanowire: fullerene solar cells revealed by photoconductive-AFM” 라는 제목으로 게재되었다.

<Energy Environ. Sci., **4**, 3646 (2011), DOI: 10.1039/C1EE01944A>

자극 반응성 고분자를 위한 새로운 물질 개발

자극에 반응해 행동이 변하는 고분자인 자극 반응성 고분자(stimuli-responsive polymer)가 연구를 통해 그 비밀들이 밝혀지고 있다. 일본 도쿄 공대(Tokyo Institute of Technology)의 Toshikazu Takata와 동료 연구자들은 로탁산(rotaxane)으로 알려진 슈퍼분자에 기반을 둔 역동적이고 조절가능한 형태의 새로운 고분자 물질을 개발했다. 단순한 로탁산(rotaxane)에서, 분자 ‘축(axle)’은 좀더 큰 원형의 분자인 ‘휠(wheel)’로 매듭지어지며, 부피가 큰 형태의 보호 그룹들이 끝 부분에 붙음으로써 이들이 위 아래로는 움직이지만 ‘휠(wheel)’을 벗어나게 하지는 못하게 한다. Takata와 동료 연구자들은 이번 연구에서 어떻게 이러한 구조들이 다이나믹한 결사슬을 지닌 보다 긴 길이의 고분자로 변하게 되는지를 보여주고 있다.

연구팀의 첫 단계는 고분자 뼈대를 만들기 위해 작은 분자 링커를 이용하여 긴 길이의 휠(wheel)’을 하나로 연결시키는 것이다. 그런 다음 이들은 ‘축(axle)’에 첨가되어 효과적으로 고분자 뼈대에 결사슬을 붙여주는 역할을 한다. 한 가지 물질이 고분자 뼈대를 형성하고 또 다른 물질이 그래프트 혼성 중합체(graft copolymer)로 알려진 결사슬로 이용되며, 이들은 혼합되어 각각의 서로 다른 고분자 물질의 속성이 매칭되게 된다. 결사슬을 구성하는 물질은 뼈대 고분자의 물성에 영향을 주어 이들을 보다 덜 부서지게 한다든지, 보다 탄성을 지니게끔 만들어준다. 로탁산(rotaxane) 기반의 그래프트 혼성 중합체(graft copolymer)이 독특한 것은 이들의 결사슬의 위치가 고정되어 있는 것이 아니라 위 아래로 움직일 수 있으며 이를 통해 고분자의 속성이 변화할 수 있다는 것이다. 지난 수십 년 동안 많은 로탁산(rotaxane)이 화학적 첨가제나 pH를 변화시켜 ‘휠(wheel)’을 조절할 수 있는 범위 내에서 ‘축(axle)’의 위치에서 만들어져 왔다. 이에 대해 Takata는 “우리와 많은 다른 화학자들이 이미 다양한 스위칭 시스템을 개발했다. 따라서, 우리는 로탁산(rotaxane) 스위치에 따라 그들의 물리적인 속성을 변화시키는 새로운 고분자 물질을 개발할 수 있을 것이다.”라고 말했다. 또한 호주 멜번대(University of Melbourne)의 고분자 화학자인 Greg Qiao는 이에 대해 “나는 이와 같은 그래프트 공중합체(graft copolymer)를 이전에는 보지 못했다. 연구자들은 어떻게 이러한 고분자들을 만들 수 있는지를 보여주었고 그들이 그것을 만드는 방법 또한 꽤 흥미로웠다. 이번 연구 결과는 새로운 종류의 고분자를 만들어 연구하는 데 시사하는 바가 매우 크다.”라고 말했다. Takata와 동료 연구자들은 그들이 만들어낸 물질에 대해 많은 가능성을 염두해 두었다. 이에 대해 Takata는 “가장 이상적인 시스템은 그래프트 사슬이 한 쪽 끝으로부터 링의 다른 쪽 끝으로 조절 가능한 움직임을 통해 이동하는 시스템이다. 만약 이러한 조절이 성공적으로 이루어질 수 있다면 실제로 이용될 수 있는 다양한 자극 조절 고분자나 고분자 물질이 만들어질 수 있을 것이다.”라고 말했다. 연구자들은 현재 열-반응 폴리로탁산(polyrotaxane)에 관한 연구를 수행하고 있으며 그래프트의

결사슬에 의약품과 같은 분자들을 가지고 있는 분자 캡슐과 같은 것들에 대한 연구를 수행하고 있다.

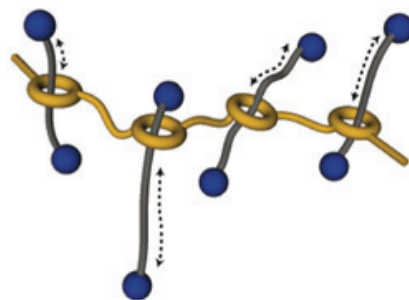


그림 3. 로탁산 고분자의 움직임

<Angew. Chem. Int. Ed., **50**, 1 (2011), DOI: 10.1002/anie.201103869>

그래핀 기반 니켈 나노결정 플래시 메모리

그래핀은 인버터, 라디오 주파수 트랜지스터, 스핀 소자, 저항 스위치, 강유전성 메모리, 그리고 플래시 메모리 등 다양한 응용 분야에 잠재력을 지니고 있다. 특히, 플래시 메모리는 그래핀과 대기 사이에 물분자 또는 히드록실기가 놓이고 이를 저장 노드(storage node)로 활용하게 된다. 메모리 성능은 주변의 습도 및 제조 공정에 크게 의존하게 된다. 따라서, 저장 노드가 대기에 노출됨에 따라 정보를 잃어버리기 쉽고 보존 시간(retention time)이 불과 수 시간으로 매우 짧다. 미국 University of California의 연구진은 그래핀을 기반으로 한 니켈 나노 결정을 이용해 플래시 메모리를 개발했다. 연구 결과는 2011년 9월 15일자 Appl. Phys. Lett.지에 “Graphene based nickel nanocrystal flash memory”란 제목으로 게재됐다.

그래핀은 코발트 박막 위에 MBE(molecular beam epitaxy) 공법으로 성장됐다[참조 1]. 성장된 그래핀은 라만 측정에서 결합 상태를 의미하는 D peak이 거의 나타나지 않았으며 투과전자현미경(transmission electron microscope, TEM)을 통해서도 고품질의 그래핀 결정임을 확인할 수 있었다. 다른 산화 실리콘 기반 위에 전사된 그래핀은 물분자와 같이 표면에 흡착된 물질과 전자를 위해 사용된 PMMA(polymethylmethacrylate) 잔재를 모두 제거하기 위해 450도에서 2시간 동안 수소와 아르곤 주입과 함께 열처리가 진행됐다. 열처리가 진행된 그래핀 샘플 위에 소자 제작 공정이 진행됐다. 소스 및 드레인 전극으로는 Ti/Au(10 nm/80 nm)가 사용됐고, 하프늄 산화막(HfO₂)은 110도에서 원자층증착법(atomic layer deposition, ALD)을 통해 성장됐다. 그림 4(a)는 -20 V에서 +20 V 사이에 드레인 전류의 변화를 보여준다. +20 V에서부터 게이트 전압이 감소하는 경우(커브 2), 그래핀 채널에서 니켈 나노결정으로 전자를 저장하기 때문에 디락점이 오른쪽 편으로 이동하게 된다. 커브 1의 경우 반대 방향이다. -10 V에서 +10 V로 변하는 경우, 메모리 윈도우가 1.9 V로 크게 감소했다. 그림 4(b)를 살펴보면 sweep range지에 따라 메모리 윈도우가 선형적인 관계를 나타남을 알 수 있고, -40 V에서 +40 V로 변하는 경우 23.1 V의 최대치 메모리 윈도우를 기록했다. 연구진은 그림 4(b)에 삽입된 그래프에서 알 수 있듯이, 니켈 나노결정을 포함하지 않는 소자도 함께 제작한 결과, 미세한 효과만이 나타났다. 이는 하프늄 산화막의 트랩에 의한 것으로, 니켈 나노결정을 통해 넓은 메모리 윈도우를 이끌어냈음을 증명할 결과이다.