

표적 치료를 위해 대식세포를 사용하고자 하는 여러 연구들이 생체 밖에서 치료용 나노입자에 대식세포를 포함시키고자 진행되고 있다. 대식세포가 침착된 치료용 나노입자는 다시 질병 부위에 주입된다. 지난 수년간 진행된 연구에서 HIV 감염, 뇌 장애, 고형 종양 등에서 이러한 치료가 매우 효과적일 수 있다는 것을 보여줬다. 그러나 이러한 기술은 약물의 방출 속도와 약효의 감소로 인해서 종종 그 한계를 드러낼 때가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해서, 과학자들은 새롭게 세포 백팩을 성공적으로 캡슐화시키는 새로운 기술을 개발했다. 이를 통해 약물의 방출 속도를 조절하고 대식세포의 표면에 존재하면서도 탐식의 내면화(phagocytic internalization)를 방지할 수 있다. “이러한 특성들은 세포를 기반으로 하는 생체하이브리드 소자를 만들 수 있는 새로운 가능성을 제시하는 것이다. 생체하이브리드 소자는 약물이나 나노입자 등을 실은 운반체를 캡슐화하는 기능과 세포의 고유의 기능을 살리는 두 역할을 동시에 할 수 있다.”고 캘리포니아대학(University of California, Santa Barbara)의 화학공학과 교수인 Samir Mitragoti 박사는 말했다. Mitragoti 교수팀은 MIT(Rubner 그룹, Cohen 그룹)와 협력 연구를 진행하고 있다. 연구팀은 세포 백팩이 약물 전달과 치료에 있어서 매우 특별한 기회를 제시하고 있다고 말했다. 현재까지 고분자 전해질 다층막은 우수한 약물전달 특성과 생체 적합성으로 많은 연구가 진행되고 있다.

이번 연구결과는 세포 백팩이 생체 밖에서 일정하게 통제된 방식으로 모델 단백질을 전달하는데 매우 유용하다는 것을 보여주고 있다. 백팩은 대식세포의 표면에 부착되어 남아있으며, 실험 시작 후 50분이 지나도 내부화가 진행되지 않고 있다. 연구팀은 나노크기의 두께를 가진 마이크로 입자인 세포 백팩을 적층 기술을 활용한 표준 리소그래피 공정으로 만들었다. 백팩은 치료용 혹은 진단용 물질을 함유하게끔 만들어졌다. 작은 분자 약물이나, 단백질, 나노입자 또는 기능성 폴리머를 함유하고 있다. 이번 연구에서는 백팩은 HA-CD44 접착과 같은 자연적인 리간드 수용체의 상호작용에 기반을 둔 비 독성 메커니즘으로 세포의 표면에 부착되었다. 연구팀은 대식세포와 같은 탐식세포(phagocytic cell)의 표면에 어떤 입자를 장기간에 걸쳐 부착하는 것은 매우 어려운 일이라고 말했다. 또한 “입자들의 다양한 특성, 특별히 크기, 표면 화학 특성, 화학적인 결합 모양, 기계적인 유연성은 식세포활동에 있어서 매우 중요한 역할을 한다.”고 말했다. 연구팀은 “대식세포의 내부화를 막는 것은 백팩의 핵심이지만, 이와 동일한 비중으로 중요한 것은 대식 세포의 자연적인 세포 기능을 간섭하지 않고 백팩을 부착하는 것을 관찰하는 것이다.”고 말했다. 이번 연구결과는 백팩은 비독성이며 세포의 증식 능력에 영향을 미치지 않는다는 것을 보여주고 있다. 더욱이 백팩의 부착이 내부화 되지 않으면 포식되는 입자를 내부화하는 대식세포의 능력에 부정적인 영향을 끼치지 않는다는 것이 실험적으로 확인되었다. 세포 백팩은

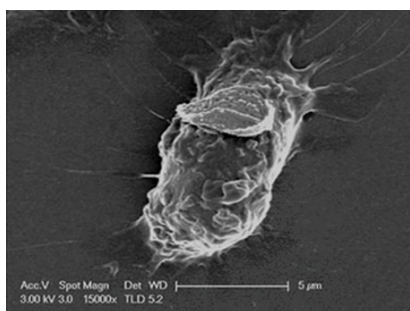


그림 4. 세포를 기반으로 하는 약물 전달 소자를 위한 백팩(대식세포의 표면에 부착된 백팩에 히알루론산(hyaluronic acid)이 코팅되어 있다).

약물 전달과 치료에 매우 특별한 기회를 제공하는 것으로 확인되지만, 추가적인 연구가 백팩의 부착이 다른 대식세포의 기능에 영향을 미치지 않는지를 알아보기 위해서 필요하다.

<Advanced Materials, DOI: 10.1002/adma.201004074>

폴리머 반도체와 폴리머 강유전체의 스위칭 특성

강유전성은 편극을 이용한 데이터 저장 소자응용을 위해 오랜 기간 동안 연구되어 왔다. 그러나 전도성과 강유전성은 무기 재료에서 독립적으로 튜닝 될 수 없어 강유전체를 이용한 저항성 메모리는 아직 구현되지 못하고 있다. 연구진은 모두 폴리머로 구성된 반도체/강유전체/반도체의 소자 구조에서 전기적 스위칭을 관찰하였다. 전하 전달을 제어하는 편극현상은 강유전체를 이용한 두 터미널 저항성 메모리소자의 실현과 최적화를 위해 중요함을 시사한다.

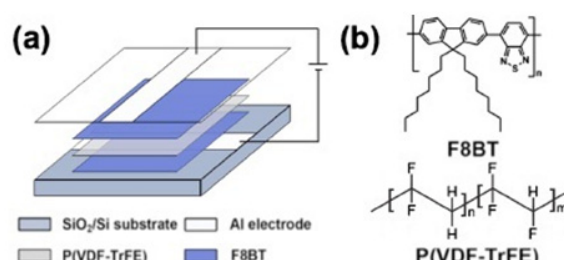


그림 5. 실험에 사용된 물질 및 소자구조.

실험에 사용된 두 터미널 샘플의 구조는 **그림 5(a)**를 통해서 볼 수 있다. 샘플은 30 nm의 F8BT와 50 nm의 P(VDF-TrFE)로 구성된다. 각 층들은 스핀 코팅을 이용하여 솔루션 타입으로 증착되었고, P(VDF-TrFE) 증착후, 샘플은 138도에서 5시간동안 열처리 되었다. Bottom과 top 전극은 30 nm 알루미늄으로 구성되며, 1 mm의 폭을 갖는다. 전기적 특성은 Precision Semiconductor Parameter Analyzer Agilent 4156C를 이용하여 글로브 박스내, 상온에서 측정되었다. F8BT는 3.5 eV의 LUMO(lowest unoccupied molecular orbital)와 5.9 eV의 HOMO(highest occupied molecular orbital)를 갖는 쌍극성 폴리머 반도체이다. 알루미늄의 일함수(4.1 eV)는 F8BT의 HOMO레벨로 정공 주입이 되기에 너무 낮기 때문에 주 전하 캐리어는 전자가 된다. P(VDF-TrFE) 폴리머의 강유전성은 분자축의 유연성으로 부터 야기되어 다이폴 모멘트 방향의 변화를 용이하게 한다. 따라서 강유전성은 결정구조의 위상으로부터 야기된다. 따라서 P(VDF-TrFE)의 열처리를 통해 결정구조의 향상은 반드시 필요하다. **그림 6(a)**와 **(b)**는 열처리를 하지 않은 P(VDF-TrFE)의 결정구조 및 위상 이미지를 보여주는데 무결정 구조를 갖음을 알 수 있고, **그림 6(c)**와 **(d)**는 열처리를 하여 잘 정립된 결정구조 및 이로 인한 강유전성의 촉진을 관찰할 수 있다. 그러나 여전히 전하 스크리닝 효과 혹은 누설전류로 인한 편극 특성이 잘 정립되지 않은 것으로 분석된다. Top과 bottom 전극 사이에 전압을 인가함에 따라 전류를 측정하였다. 열처리를 하지 않은 P(VDF-TrFE)는 비전도성(nonconductivity)을 보인 반면, 열처리 된 샘플은 편극이 전기적 특성에 영향을 미치는 것으로 나타났다. **그림 7**은 열처리된 샘플의 전형적인 전류-전압 특성을 보여준다. 전압이 0~5 V로 변화함에 따라 (커브1), 약한 스위칭 특성이 -2.1 V에서 관찰됐다. 높은 전류는 열처리에 의해 생긴 누설전류 때문인 것으로 분석된다. 전압이 반대로, -5 V에서 0 V

로 변화함에 따라 전류는 비교적 높은 수준을 유지하게 된다. 커브1 측정 이후에, 반대의 8 V의 전압펄스에 대한 응답이 측정됐다(커브2). 순방향 스캔에서, 낮은 전도성 상태의 전류는 -1 V의 전압에서 약 40배 정도 작고, 전류의 점진적인 증가를 갖는 스위칭 특성은 -2.2~-3.5 V의 범위 내에서 변화할 때 관찰되었다. 역방향스캔에서 전류는 다시 높은 전도성 상태를 갖고, 처음의 스캔과 같은 수준의 전류를 갖는다. 관찰된 스위칭 특성은 P(VDF-TrFE)층을 통해 향상된 전자 전달 확률 때문인 것으로 분석된다. 연구진은 두 반도체 폴리머 사이에 폴리머 강유전체를 삽입한 소자 구조에서 전기적 스위칭 특성을 확인할 수 있었다. 이 결과는 유전체를 통한 전류의 제어를 통해 전달 확률과 관련이 있는 편극의 중요성을 입증하고, 두 터미널 저 항성 소자 실현과 최적화를 위해 기초가 되는 연구라 할 수 있다.

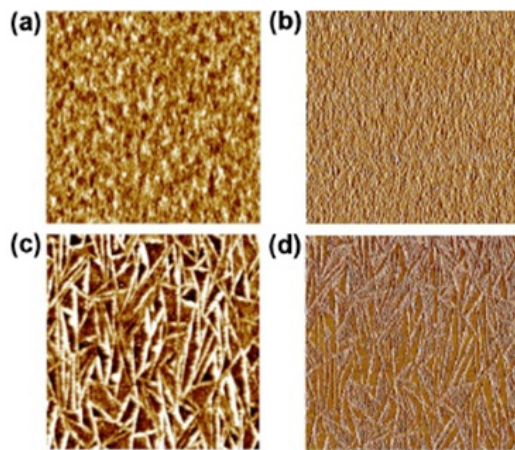


그림 6. AFM 이미지.

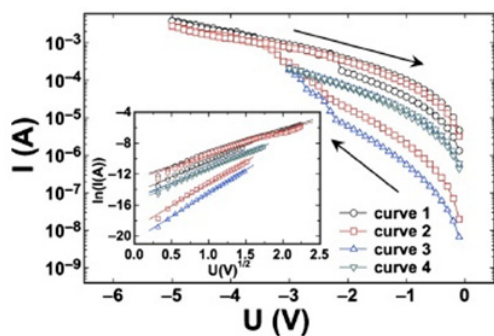


그림 7. 열처리된 샘플의 전류-전압 특성.

<Applied Physics Letters, DOI: 10.1063/1.3584854>

유기 반도체를 위한 금속 컨택 증착법

유기 소자에 금속의 top 전극을 증착하는 공정은 기술적인 어려움이 있다. 안정적이고, 저렴하면서도, 비파괴적 프린팅 공정을 이용하여 rubrene 단일 결정위에 컨택을 하는 공정방법이 발표되었다. 잘 휘어지는 기판, 불소가 첨가된 자기 정렬 단일층, 나노 임프린트 공정, 표면 화학 처리법을 접목하여 매우 부드러운 금속 컨택과 유기 결정 사이에 등각의 (conformal) 컨택을 만들 수 있었다. 공간 전하 제한된 전류(SCLC-Space Charge Limited Current)측정을 통하여 플립칩 적층 공정된 컨택에서 전자빔 증발된 컨택보다 더 좋은 접합면 특성을 갖는 것으로 평가됐다.

<소자 공정>

그림 8은 플립칩 적층(FCL-Flip Chip Lamination)을 이용하여 rubrene 단일 결정위에 금속 컨택을 만드는 과정을 보여준다. 먼저, **그림 8(a)**의 화학구조를 갖는 자기정렬 단일층(SAM-Self Assembled Monolayer) RL1을 실리콘 웨이퍼 위에 준비한다. 화학 표면 처리법은 실리콘 표면의 자유 에너지를 낮추고, 실리콘과 금 사이의 접착력을 줄이기 위해 필요하다. 100 nm의 금 전극을 RL1-Si 기판위에 증착한 후(**그림 8(b)**), 불소화된 thiol SAM, RL2와 약하게 접착된 금 전극을 다룬다(**그림 8(c)**). RL2는 플라스틱 기판위에 금 레이어의 전사를 돕는 기능을 한다. Si/Au의 접착력이 Au/PET의 접착력 보다 작지만, 금(Au) 레이어가 전사되기에 충분할 정도로 약하게 접착된다(**그림 8(d)**). CF₃에 의해 중단된 표면의 에너지는 순수 Au보다 작기 때문에 Si으로부터 PET로 RL2/Au의 전사는 상업용 임프린트 도구를 사용하여 90도, 250 psi, 5분간의 공정조건을 필요로 한다. 이 순차적인 공정은 매우 부드러운 Au표면을 만들어내고, 이는 rubrene 단일 결정과 등각의 컨택을 만들도록 직접적 도움이 된다(**그림 8(e)**). Rubrene결정들은 균일하게 금속 표면에 적층된다(**그림 8(f)**). 마지막으로 rubrene/Au 이 소자 기판위에 전사된다(**그림 8(g)**).

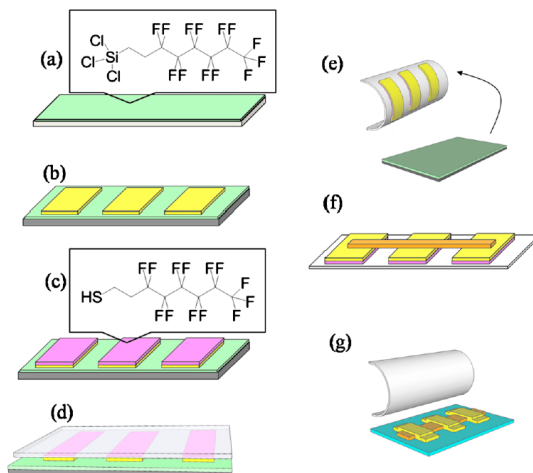


그림 8. FCL공정 개략도.

<측정 결과>

FCL을 사용하여, 우수한 특성의 전기적 컨택을 휘어지면서도 투명한 기판위에 rubrene 단일 결정들을 위해 만든다(**그림 9(a), (b)**). 이 공정의 가능성을 입증하기 위해, 연구진은 다양한 크기와 모양의 금 패턴을 테스트했다. **그림 9(c)**는 휘어지는 기판위에 바늘과 같은 rubrene 단일 결정들 위에 100 nm 두께의 FCL 컨택이 형성됨을 보여준다. **그림 9(d)**는 rubrene 결정과 크고, 넓은 컨택을 보여줌으로서, FCL이 유기 전자 재료를 위한 금속성 컨택을 만들기 위한 매우 유망한 공정방법임을 제시한다. **그림 10**은 다른 공정방법으로 증착된 두개의 금 전극 사이의 rubrene 단일 결정의 공간 전하 제한 전류 (SCLC)의 측정 결과를 비교하여 보여준다. 두 소자 모두에서, 결정들은 bottom Au 컨택 위에 적층되었고, bonded contact을 이룬다. Top 컨택은 두 샘플의 경우 다르게 공정되었다. **그림 10(a)**에 나타난 샘플은 top 컨택이 전자빔 증발법으로 공정되었고, **그림 10(c)**에서 보여진 결정을 위한 top 컨택은 FLC 테크닉이 사용하였다. **그림 10(b)**에 나타난 전류-전압특성은 top 컨택을 통해 유입된 전하와 bottom 전극을 통해 유입된 전하의 양의 차이