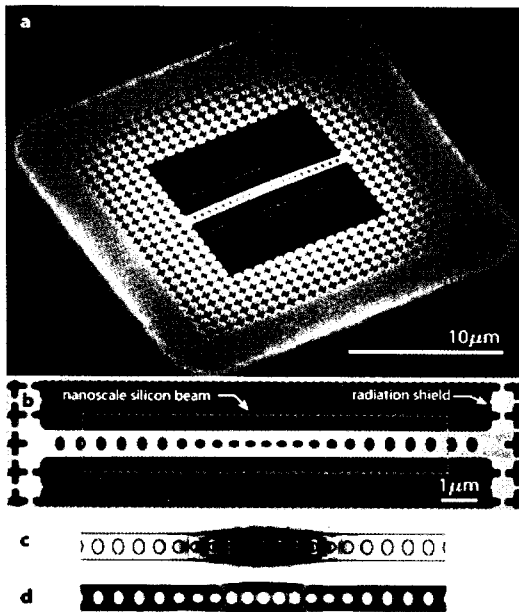


Photonics Application

Optical Material, Optical Precision Instruments

광응용(광소재, 광정밀기기)

레이저를 이용한 나노소자 냉각법



〈그림〉 주사 전자 현미경 사진. (a) 레이저 냉각 실험에서 사용된 나노크기 기계적 실리콘 공진기. (b) 레이저 광이 빔의 기계적 운동을 냉각시키기 위해 사용된 광학적 구멍. (c)와 (d)는 수치적 시뮬레이션과 나노빔의 기계적 운동.

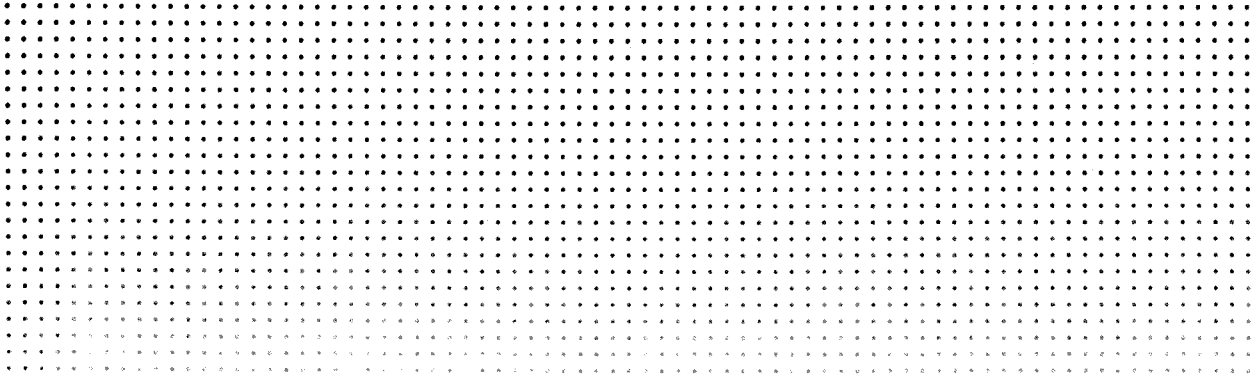
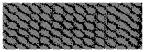
캘리포니아 공과 대학(California Institute of Technology)과 빈 대학(University of Vienna)의 연구진은 레이저를 이용해서 나노기계 소자를 가장 낮은 에너지 상태로 냉각시키는 방법을 최초로 개발했다. 이러한 기술은 고성능 센서 개발과 새로운 초전도체 개발에 큰 활력을 불어넣을 것으로 기대된다.

연구진은 양자 기계 법칙을 따르는 빛을 이용해서 기계적 시스템을 작동시켰다. 과거에, 이것은 포집된 단일 원자 또는 이온으로 달성될 수 있었다고 이 연구를 이끌었던 Oskar Painter 교수가 말했다. 이 연구결과는 저널 Nature에 게재되었다. 연구진은 선택된 주파수의 레이저 광이 시스템에 들어 올 수 있도록 나노

크기 소자(매우 작은 기계적 실리콘 빔)를 만들었다. 이것은 레이저 광이 반사되면 열 에너지를 빼앗아 버려서 시스템을 냉각시킨다. 패턴이 형성된 실리콘 실드(shield)와 빔의 각 요소를 신중하게 설계함으로써, 연구진은 양자 기저 상태로 시스템을 이끌 수 있는 레이저 냉각 기술을 개발할 수 있었다. 이때, 기계적 진동은 절대 최소(absolute minimum)에서 존재하는데, 이것은 이러한 기계적 냉각 소자가 매우 작은 힘 또는 질량을 검출하는데 도움을 줄 수 있을 것이다.

이 실험은 흥미로운 양자 기계적 실험을 위한 출발점이 될 것이라고 연구진은 말했다. 예를 들어, 과학자들은 기계적 시스템에 양자 중첩이 존재한다는 사실을 증명하고 싶지만 이러한 실험을 시작하기 위해서는 양자 기저 상태의 시스템이 필요하다. 이런 기저 상태에 도달하기 위해서는 기계적 빔으로 100 밀리켈빈(-273.15° C) 이하로 온도를 냉각시켜야 한다. 이것은 빔이 기가헤르츠(GHz) 주파수에서 진동하도록 설계되었기 때문이다. 포논(Phonon)은 가장 기본적인 진동 단위이다. 이 시스템의 모든 포논은 기저 상태로 냉각하기 위해서 제거되어야 한다.

이러한 온도로 냉각시키기 위한 기존의 수단은 존재하지만 비용이 많이 들고 몇몇 경우에는 비현실적인 장치가 필요하다. 또한 이러한 기계적 냉각 시스템을 측정할 수 있는 방법에 대한 이해가 문제로 남아 있다. 이런 두 개의 문제를 해결하기 위해서, 이번 연구진은 다른 냉각 방법을 사용했다. 연구진이 수행한 방법은 광자를 이용하는 것이다. 그렇게 함으로써, 연구진은 빔의 길이 이하로 특정 주파수의 레이저 광을 이끌도록 정확한 위치에 매우 작은 구멍들을 뚫었다. 이런 구멍들은 거울처럼 활동했고 동공 속으로 빛을 포집하고 빔의 기계적 진동과 강하게 상호작용하였다. 광의 주파수 편이가 기계적 소자의 열적 운동과 직접적으로 관련되기 때문에, 광은 빔의 운동과 온도와 같은 기계적 시스템에 대한 정보를 전달한다. 따라서 연구진은 광자 속에 기계적 시스템의 정보를 변환시킬 수 있는 기계적 요소를 사용해서 효율적인 광학 인터페이스를 만들었다. 여기서 중요한 것은 마이크로파 또



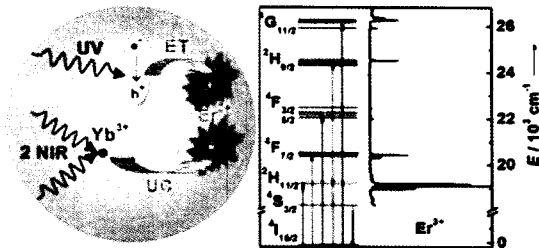
는 전자와는 달리 광은 킬로미터 이상의 긴 거리로 전달될 수 있기 때문에 이러한 광기계학적 변환기는 서로 다른 양자 시스템을 연결하는데 유용하게 사용될 수 있다.

이 연구결과는 나노기계적 소자를 이용해서 양자 기저 상태로 냉각시킨 첫 번째 사례는 아니다. 그러나 이 새로운 연구는 광을 이용해서 나노기계적 소자를 기저 상태로 냉각시킨 최초의 사례이다. 다른 냉각 기술들은 대략 20 밀리켈빈의 온도에서 작동된다. 이상적인 것은 상온에서 이런 실험을 개시하는 것인데, 이번 연구진이 사용한 레이저 냉각을 이용하면, 훨씬 더 높은 온도에서 이 실험을 수행할 수 있다고 연구진은 말했다. 이 연구결과는 저널 Nature에 "Laser cooling of a nanomechanical oscillator into its quantum ground state" 라는 제목으로 게재되었다.

(www.nanowerk.com)

중국, '희토를 도핑한 반도체 나노 발광재료' 연구에서 새로운 성과 달성

희토 이온과 반도체 나노 결정(Crystal)(혹은 양자점(Quantum dots)) 자체는 모두 매우 이상적인 발광(發光) 재료에 속하며 "어떻게 하면 희토 이온과 반도체 나노 결정의 효율적인 결합을 통해 새로운 효율적인 발광 혹은 레이저 부품을 개발할 수 있을가" 라는 연구테마는 국내외 과학자들이 주목하고 있는 과학 연구 과제에 속한다.



<그림> 희토를 도핑한 TiO₂ 나노 결정 감응(Sensitized) 발광 및 변환(Conversion) 발광 표시도

절연체(Insulator) 나노 결정에 비해, 반도체 나노 결정의 'Exciton Bohr 반경(radius)' 은 더욱 크기 때문에 양자 제한 구역 효과는 도핑을 한 반도체 나노 결정의 발광 성능에 끼치는 영향을 더욱 뚜렷해지게 함으로써 사이즈에 대한 조정 통제를 통해 새로운 광전자 성능을 보유한 발광재료를 디자인할 수 있게끔 한다. 동시에 희토 이온과 매트릭스(Matrix) 양 이온의 이온 반경 차이가 크고 전하(Electric charge)가 매칭되지 않기 때문에 3원자가 희토 이온은 일반적으로 대체 결정 격자(Lattice) 위치를 대체하여 반도체(예를 들면 ZnO와 TiO₂) 나노 결정 속에서 도핑을 할 수 없게 된다.

현재 국내외 관련 과학연구 결과를 보면, 대부분이 희토가 반도체 나노 결정 표면 혹은 근(近) 표면에서 미약한 발광을 한다는 연구결과를 도출한 상황인 것으로 나타나고 있다. 희토 이온의 체상(體相) 도핑은 현재 이런 유형의 재료 연구가 직면한 '보틀넥(Bottleneck)' 문제로 되고 있는 동시에 신재료 개발에서 직면한 새로운 도전이 된다.

중국 '국가 과학기술부(MOST)' 의 '국가 첨단기술 산업화 프로젝트(863 계획)', '국가 중대 기초과학 연구 프로젝트(973 계획)' 및 중국 '국가 자연과학 기금 위원회(NSFC)', '중국 과학원(CAS)' 의 '백인계획(百人計劃)' 프로그램, 푸젠성(福建省)의 '걸출(杰出) 청년 과학자 프로그램' 지원을 받아 푸젠성(福建省) 푸저우시(福州市)에 위치하여 있는 '중국과학원(中國科學院) 산하 '푸젠(福建) 물질구조 연구소' 소속 '중국과학원 광전자 재료 화학 및 물리 중점 실험실' 의 천쉐위안(陳學元) 연구원 연구팀은 '희토를 도핑한 반도체 나노 결정 연구' 에서 새로운 과학연구 성과를 달성하여 이수가 되고 있다.

천쉐위안 연구원 연구팀은 희토 이온이 TiO₂ 나노 결정 속에서의 체상 도핑을 성공적으로 실현하였으며 에추석(Anatase)광(鑛) 형태의 TiO₂ 구(球) 상태의 멀티 결정 집중체 속에서 희토 이온이 예리하고 강한 발광을 한다는 점을 관찰해 내는데 성공하였다. '저온 고 해상도 형광 광 스펙트럼 실험' 을 통해 연구팀

Photonics Application

Optical Material, Optical Precision Instruments 광응용(광소재, 광정밀기기)

은 Er³⁺가 TiO₂ 나노 결정 속에서 국지 구역 전자 구조와 결정 체 필드(Crystal field) 에너지급에 대해 계통적인 분석과 계산을 실행하여 최초로 실험을 통해 단일 격자 위치를 차지한 Er³⁺이 예추석(Anatase)광 형태의 TiO₂ 속에서 전체 결정체 필드 계수(Parameter)를 확정하였다.

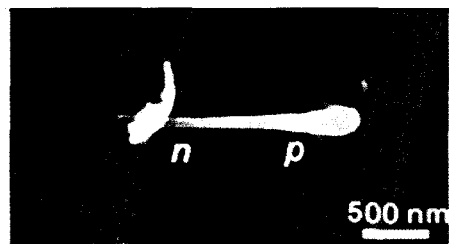
이번 연구결과는 기타 희토 이온이 이산화 티타늄(Titanium dioxide) 반도체 나노 결정 속에서의 광 스펙트럼 성능 및 국지 구역 구조 연구를 추진하는 면에서 중대한 역할을 발휘하게 될 것으로 전망된다. 이번 연구결과를 정리한 과학연구 논문은 지난 9월 20일에 'Small' 학술지 온라인 판으로 공식 발표되었다(DOI: 10.1002/sml.201100838)고 한다.

이번 중요한 과학연구 성과를 달성하기 전에 천쉴위안 연구원 연구팀은 유러퓸(Europium) 이온을 '광 스펙트럼학 탐침(Probe)'으로 이용하여 "Eu³⁺이 TiO₂ 속에서의 멀티 격자 위치를 차지하고 있으며 Eu³⁺의 국지 구역 구조 대칭성은 오리지널(Original) D_{2d}에서 D₂와 C_{2v}로 내려오게 된다"는 사실을 입증하였다(J. Phys. Chem. C, 2008, 112, 10370).

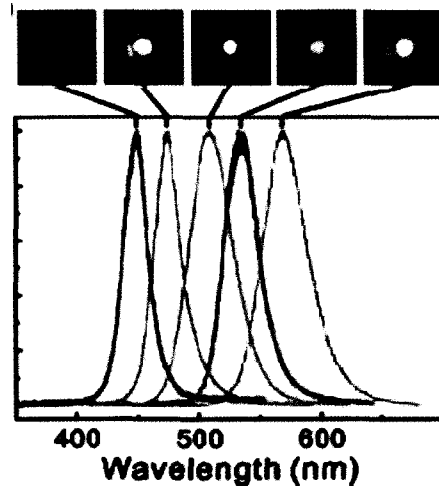
동시에 연구팀은 Sm³⁺, Nd³⁺을 도핑한 TiO₂ 나노 결정 속에서 TiO₂ 매트릭스에서 Nd³⁺까지의 효율적인 에너지 전달을 구현(J. Phys. Chem. C, 2009, 113, 8772) 하였으며, 희토를 도핑한 ZnO(Opt. Express, 2009, 17, 9748; J. Phys. Chem. C, 2008, 112, 686), SnO₂(Opt. Lett. 2009, 34, 1873), In₂O₃(J. Phys. Chem. C, 2010, 114, 9314) 등 반도체 나노 발광 재료 연구에서도 여러 가지 중요한 과학연구 성과들을 달성하였다.

(www.cas.cn)

단일 반도체 화합물은 이용한 무지개색 LED

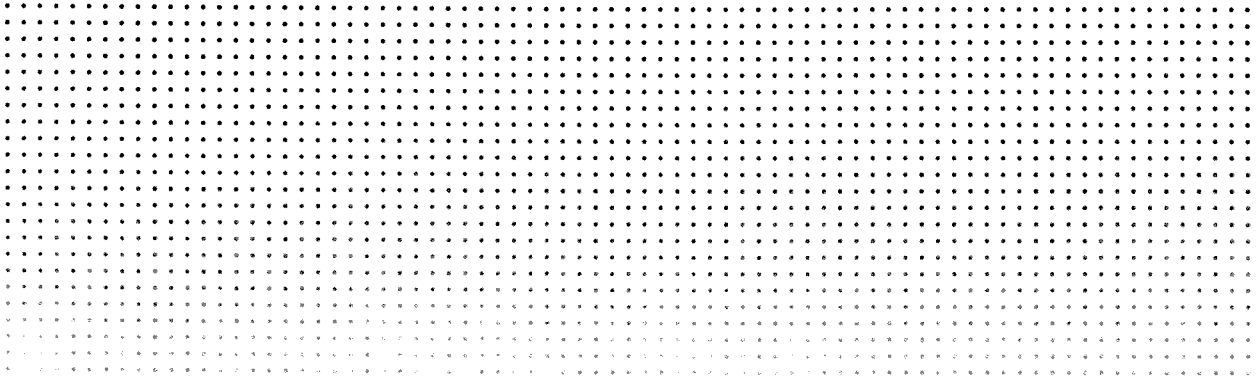
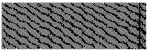


〈그림 1〉 제작된 GaN/InGaN 나노로드 LED 소자의 주사전자현미경 이미지 및 500nA 전류 인가에 대해 발생한 빛의 광학 이미지.



〈그림 2〉 상온에서 측정된 소자의 전류-전압 특성 및 주입 전류에 따른 (100~500nA) 단일 LED 소자의 전기발광 스펙트라. 삽입된 그래프는 전류 증가에 대한 선형적 전기발광 세기의 증가를 나타낸다.

다양한 색을 지닌 발광다이오드(LED; Light-emitting diodes)는 우리 삶 어디에서나 볼 수 있다. LED에서 방출되는 빛의 파장 또는 색은 사용되는 반도체 물질에 의해 결정된다. 하지만 산업에서 요구하는 간단한 구조를 지니면서 광범위한 스펙트럼을 갖는 LED를 제작하기 어렵다.



타이완 National Tsing-Hua University의 Shangji Gwo 교수가 이끄는 연구진은 단일 반도체 화합물을 이용한 무지개색 LED를 개발했다. 연구 결과는 APL지에 “Single InGaN nanodisk light emitting diodes as full-color subwavelength light sources”란 제목으로 게재됐다.

LED의 방출 파장은 반도체 물질이 지닌 전자 구조 내 에너지갭에 의해 결정된다. 화합물 반도체의 조성비를 조절함으로써, 근본적으로 이러한 에너지갭에 영향을 주고 발생하는 빛의 색을 튜닝할 수 있게 된다. 하지만 조성비 자체는 물질을 불안정하게 만들 수 있고, 반도체 함금 박막의 경우 매우 민감하기 때문에 그 한계가 있다. 따라서 적절한 주파수에 대해 가시광선 영역의 색을 만들어내기 어렵다.

나노 수준에서는 벌크 영역에서 불가능했던 조성비율을 이용해 안정한 물질을 만들 수 있다. 반도체 함금 중 하나인 InGaN을 예로 들면 간단하게 인듐과 갈륨의 비를 조절함으로써 전체 가시광선 스펙트럼을 따라 연속적으로 튜닝이 가능하다.

Shangji Gwo 교수와 그의 동료들은 화학적으로 도핑된 p 타입, n 타입 GaN 나노로드와 가운데에 위치한 InGaN 나노디스크를 이용해 광범위한 스펙트럼을 나타내는 소자를 제작하는데 성공했다. 나노로드에 주입된 전하는 InGaN에서 국한 현상과 함께 빛으로 변환되어 방출하게 된다. 이러한 구조를 통해, 연구진은 동일한 반도체 시스템을 이용해 다양한 파장의 빛을 방출하는 다수의 LED를 제작할 수 있었다.

먼저 실리콘 기판 위에 1.2 um 길이를 갖는 n 타입 GaN을 성장하고, 그 위에 40 nm 두께의 InGaN을 성장한다. 마지막으로 나노디스크 위에 800 nm의 p 타입 GaN을 성장함으로써 <그림 1>의 주사전자현미경 이미지와 같은 소자를 제작할 수 있다. 직경 90 nm, 두께 40 nm의 나노디스크는 상온에서 훌륭한 다이오드 특성을 입증했다. <그림 2>의 아래쪽 그래프는 전류 주입에 따른, 475 nm 파장에 대한 전기 발광의 변화를 보여주고 있다. 전류가 100 nA에서 500 nA로 증가함에 따라, 소자는 어떠한 감소 현상

도 없이 선형적인 세기 증가를 나타냈다. 최대 전류 밀도는 8000 A/cm²에 이르는 것으로 나타났으며, 이는 통성적인 InGaN LED 소자가 지닌 10 A/cm²에 비해 월등히 높은 수치이다.

나노로드 LED는 단일 반도체 시스템에서 광범위한 튜닝 가능성과 함께 빛을 작은 점에 집중시킬 수 있을 만큼 충분히 작기 때문에 각종 현미경 시스템에도 활용될 수 있다. 이는 컴퓨터 칩 제작과 같은 광리소그래피 기술에도 나노로드 LED를 적용할 수 있다. 또한 고체 상태 라이팅 및 태양광 소자에도 활용이 가능하며, 미래에는 초고밀도 정보 저장 기술, 회절 범위 이하의 나노리소그래피, 단일 분자 센싱등의 영역에서 잠재력을 지니고 있다.

(www.nanowerk.com)

**PHOTONICS
INDUSTRY
NEWS**

www.kapid.org

ISSUE

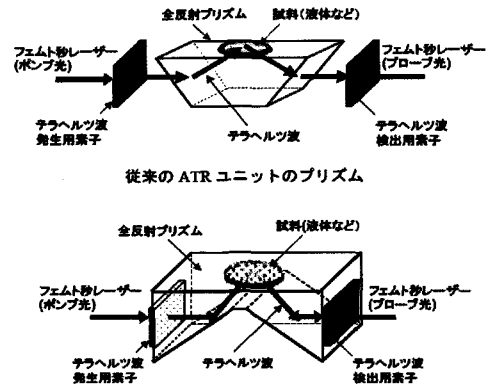
광응용(광소재, 광정밀기기) 신기술 신제품

테라헤르츠파 감쇠전반사분광법(ATR) 전용 분광분석장치 개발

광기술이 개척한 가능성 중 하나로서 파장영역의 확대를 목표로 오랜 기간 동안 테라헤르츠(THz)파의 연구를 진행해 왔다. 그 결과로서, 일본 하마마츠토포닉스가 독자적으로 개발한 THz파용 소자 일체형 프리즘을 탑재한 액체시료가 계측가능하고 분체시료의 전처리 불필요한 THz파 감쇠전반사분광(ATR)법 전용 분광분석장치를 개발하였다. 이것에 의해 ATR법에 의한 계측이 간편하게 되어 의약품 분석, 액체, 분체 및 고체의 비파괴 분광, 수화물의 평가 등 폭넓은 분야에서의 연구개발이 진행될 것으로 기대된다.

최근, THz파는 빛과 전파 사이에 있는 전자 주파수대의 응용 개척이 급속하게 진행되고 있다. THz파 영역은 약 100GHz에서 10THz의 주파수 영역으로 파장으로 환산하면 3mm에서 30μm에 해당하는 전자파의 총칭이다. THz파의 특징은 1광자의 에너지가 수 meV에서 수십 meV로 X선의 약 100만분의 1로 작다. 인체에도 안전하며, 비금속 물질을 투과하며 물의 흡수가 크다. THz파 영역에는 다양한 물질이 고유의 흡수스펙트럼을 가진 것이 밝혀졌으며, 화학물질 및 당류, 아미노산류, 비타민류, 지질, 단백질에 물질고유의 흡수스펙트럼이 보고되어 있다. 또한, 고체 중의 광학포논(phonon) 산란, 플라즈마 주파수, 초전도 갭, 분자 진동, 분자간 상호작용 등이 THz파 영역에 있기 때문에 응용 가능성은 갭, 분자의 진동, 분자간 상호작용 등이 THz파 영역에 있기 때문에 차세대 산업에 큰 역할을 다할 것으로 기대하고 있다. 그럼에도 불구하고 THz파 영역은 전자 디바이스의 동작 상한 주파수에 가까울 것과 다른 주파수대와 비교하여 발생이 곤란하여 양질의 검출기가 없고, 물의 흡수가 크게 영향을 미친다는 것이 문제였다. 그 때문에 지금까지 산업적으로 이용이 곤란한 미개척 영역으로 인식되어 왔으나, 최근 수년 레이저기술과 반도체 디바이스기술이 향상되고, THz파 영역의 분광과 이미징 연구가 세계적으로 활발히 이루어지게 되었다.

THz파는 물에 강하게 흡수되므로 통상적으로 투과계측에서는 500μm 두께로 1,000억분의 1로 감쇠하여 투과하지 않게 된다. 그 때문에 단백질과 DNA 등의 생체 고분자의 수용액과 같이 물의 흡수가 크고, 두꺼운 시료의 투과계측은 곤란하였다. ATR법은 플라즈마 면에 임계각도 이상으로 THz파를 입사시켜, 전반사 시



〈그림〉 독자 개발한 일체형 플라즈마

에 플라즈마 면을 스며 나온 소멸파(Evanescent wave)와 시료를 상호작용시켜, 그 결과 감소한 감쇠반사율을 관측하는 계측법이며, 흡수가 큰 물 등의 시료 계측이 가능하다. 또한, 투과계측의 경우 분체는 폴리에틸렌 분말과 혼합하고 압력을 주어 정제상으로 제조한 것을 계측할 필요가 있었으나, ATR법에서는 처음 그대로의 상태에서 계측이 가능하다.

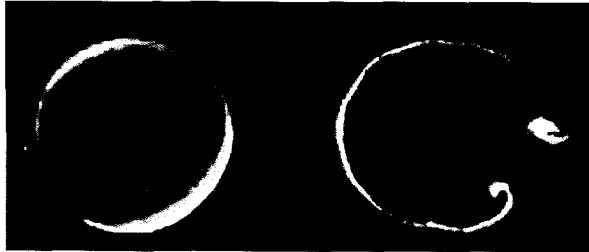
ATR법으로 액체, 분체, 고체가 쉽게 분광계측할 수 있기 때문에 수소결합 등의 약한 분자간 상호작용, 구조이성체의 동정(同定), 결정격자구조의 차이(결정다형)의 분별 등의 연구에 유용하게 활용할 수 있다.

본 개발품은 독자개발의 THz파용 소자일체형 플라즈마를 탑재하고, ATR법 전용으로 장치화한 것이다. 주요 디바이스의 전반사 플라즈마에는 THz파를 잘 투과하는 고저항 실리콘을 재료로 이용하여 다축정밀가공기(多軸精密加工機)로 가공하고, THz파용 광전도 소자의 발생용 소자와 검출용 소자를 플라즈마에 접촉하여 일체화한 것으로서 입출사 계면에서의 반사손실을 저감하였다.

또한, 종래의 ATR유닛 등에서는 소자와 플라즈마가 따로 따로 배치되어 있기 때문에 입출사 계면에서의 THz파의 반사손실이 크고, 또한 THz파의 수증기 등에 의한 흡수의 영향을 억제하기 때문에 질소를 충전하였다. 본 개발품은 일체형 플라즈마로 함으로써 소자와 플라즈마 간의 질소 충전이 불필요하게 됨과 동시에 집광렌즈 등의 광학계도 불필요하게 되었다.

(jp.hamamatsu.com)

색 변화 스트레스 센서



거시적인 관점에서 시스템의 구조적 변화 또는 고장에 대한 경고 신호는 매우 유용한 요소이며, 널리 활용되고 있다. 하지만 앞으로의 과학 기술이 나노 세계에 중점을 두고 있는 만큼, 수 나노미터 수준에서 발생하는 변화를 인식할 필요가 있다.

미국 University of Pennsylvania와 Duke University의 공동 연구진은 간단한 색 변이로부터 경고 신호를 발생시킬 수 있는 기술을 개발했다. 연구 결과는 Proceedings of the National Academy of Sciences지에 “Sensing membrane stress with near IR-emissive porphyrins”란 제목으로 게재되었다.

이번 연구에서는 자연적으로 생성되는 포르피린(porphyrin)과 인공적으로 생성되어 내부의 관을 통해 약물을 운반할 수 있는 폴리머솜(polymersome)이 활용됐다. 연구진은 특정 타입의 발광 포르피린과 함께 멤브레인을 내장할 수 있다면 폴리머솜을 스트레스 센서로 이용할 수 있다는 가정을 세웠다.

Duke University의 Michael Therien 교수는 포르피린을 최초로 개발했으며, 폴리머솜에 발광 분자를 연결하기 위해 이번 연구에 참여했다. 폴리머솜에 빛이 인가되면 포르피린이 빛을 흡수하고 특정 파장의 빛 또는 색을 다시 방출하게 된다. 포르피린은 형태나 농도에 따라 방출하는 빛을 제어할 수 있기 때문에, 폴리머솜을 스트레스 센서로 활용함에 있어 중요한 역할을 하게 된다. 이러한 포르피린을 폴리머솜 멤브레인과 같이 특정한 환경에 놓게 되면, 분자로부터 빛 방출을 제어할 수 있다. 멤브레인에 스트레스가 인가되면, 포르피린의 형태가 변하고 광학적 특성이 변한다. 이러한 변화를 통해 스트레스의 정도를 측정할 수 있다. 예를 들어, 특정한 폴리머솜을 혈류에 주입하고 적혈구 사이에 놓임으로써, 스트레스를 모니터링 할 수 있다. 동맥이나 다른 혈

관 내부에 장애물이 놓인 경우 혈류의 변화가 생기고 이를 파악함으로써, 혈액순환에 관한 의학 정보를 읽어낼 수 있다.

연구진은 폴리머솜을 긴장 상태, 열, 그리고 다른 종류의 스트레스에 노출시키고 색 변화와 함께 그 수치를 계산했다. 그 변화는 근적외선 영역으로 육안으로 측정이 어렵고 컴퓨터를 이용해 측정이 필요하다. 자성이나 방사선이 아닌 빛을 이용한 신체 스캐너 기술은 빠르게 발전하고 있으며, 이번에 개발된 기술은 새로운 의학 분야에도 큰 도움이 될 것으로 보인다. 의학 분야는 이미 유사한 분자 기술을 활용하고 있으며, 폴리머솜을 이용한 약 운반 시스템 개발이 가능할 것이다. 기존의 약 운반 시스템은 특정 부위에 약을 방출한다는 기능만 있지만, 위의 시스템은 특정 부위에 어느 정도의 약을 방출한다는 구체적인 정보 모니터링이 가능하다.

현재 연구진은 넓은 범위의 스트레스를 견딜 수 있는 특정 폴리머솜을 활용했지만, 앞으로는 자연적으로 발생하는 조직을 이용해 똑 같은 기술을 적용할 수 있을 것이라고 밝혔다.

(www.nanowerk.com)