

모포나비 날개의 푸른색 ‘나노의 신비’

글_ 이정일 KIST 책임연구원 · 금동화 KIST 책임연구원 dwkum@kist.re.kr

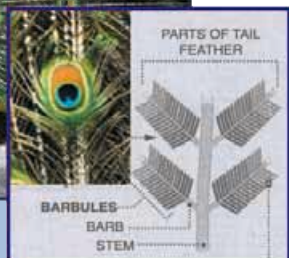
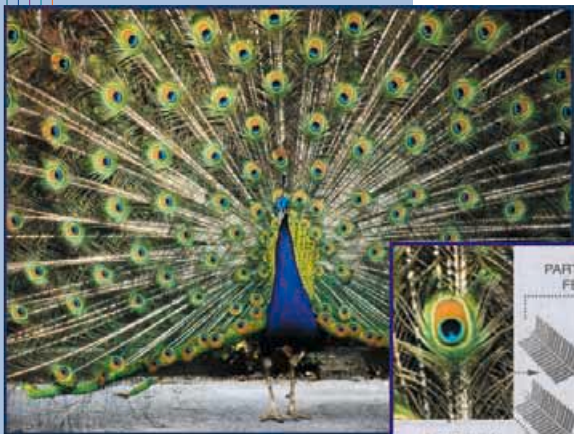
색은 형체와 함께 주변 사물의 정체성을 나타내는 표상이다. 자연이 아름답게 보이는 것은 다양한 모양과 색채가 조화를 이루기 때문이다. 식물은 잎과 꽃이 나고 지면서 색이 바뀌며 계절의 변화에 적응한다. 많은 동물도 생활환경과 기후 변화에 털갈이를 하고 몸의 색을 바꾼다. 색은 멋과 아름다움을 나타내는 중요한 수단이다. 어느 나라를 처음 방문하면, 공항에서 접하는 사람들의 의복과 거리의 색채로부터 그 나라의 문화 수준과 전통적인 특징을 기늬한다고 한다. 이처럼 색은 오래전부터 인간 생활의 모든 요소에 깊이 자리 잡고 있어서 경제와 기술 발전에 중요한 몫을 차지하고 있다.

색은 주로 안료가 결정한다. 안료는 특정한 색만을 흡수 혹은 반사시키는 화학물질인데, 동물과 식물의 대사과정과 광합성 과정에서 자연적으로 만들어지거나 인공적으로 합성한다. 색을 구현하는 다른 방법으로 물질의 내부구조를 바꾸어 특정한 파장의 색만을 흡수 혹은 반사하는 방식이 있다. 대표적인 예로 무지개를 꼽을 수 있다. 무지개는 색이 없는 작은 물방울이 모여 있는 집합체인데, 태양빛이 가진 가시광선의 간섭효과로 붉은색부터 푸른색까지 연속적으로 변화하는 띠를 이룬다. 염료 없이 구조적인 효과(structural colour)로 인해 색을 띠는 예는 우리 주변에 많이 있다. 무지개 송어와 버들치의 비늘, 자개로 쓰이는 조개껍질, 공작새 깃털, 오팔 반지 등이 잘 알려진 예다. 이들은 무지개처럼 여러 색을 가지며 보는 방향에 따라 색조가 변하여, 어느 방향에서 보더라도 색이 변하지 않는 염료와 다른 특징을 가지고 있다. 특이한 점은 자연에서 구조색은 모두 이들이 간직하고 있는 나노 현상에 기초를 두고 있다는 사실이다.

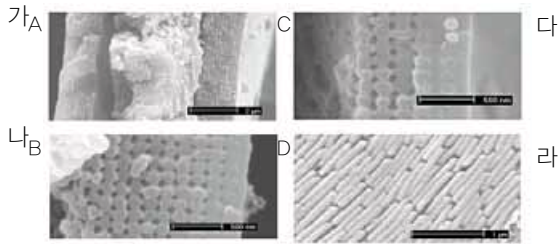
이번 호에서는 공작새 꼬리털, 모포나비 날개 및 오팔에 숨겨진 나노 세상을 소개하고, 동일한 현상에 기초를 두고 연구되고 있는 첨단 광결정 소자와 향후 개척 가능성을 소개한다.

멜라닌 막대의 격자 배열이 총천연색 비밀

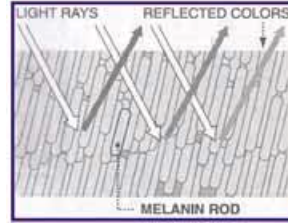
공작새가 꽂지깃털을 펼치고 총천연색의 자태를 뽐내는 모습은 아름다움과 순결의 상징이며 이국적인 신비로 각인되어 있다. 작은 야자 잎과 같은 모습의 깃털 끝 부분에 환한 색상이 동심원을 이루고 있어서 커다란 눈망울처럼 보인다. 이런 색조는 계절에 따라서 변화하는데, 짝짓기를 하는 5월경에 가장 화려한 모습을 갖는다(그림1 참조). 공작새가 꽂지깃털을 펼쳐서 자기 몸체를 키우고 화려하게 장식하는 이유는 주변으로부터 위협에 대한 경고와 자기보호의 수단이며 짝짓기를 위한 암놈을 유혹하는 목적이라고 한다.



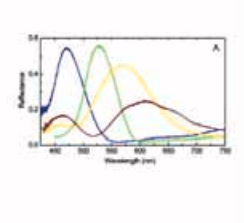
〈그림1〉 공작새의 사진과 털의 구조



〈그림2〉 (가) 미세 깃털의 단면으로 종단면, (나) 청색털의 외부층, (다) 갈색털의 외부층과 (라) 깃털의 횡단면



가



나

〈그림3〉 (가) 멜라닌 나노구조에 의한 빛의 회절 현상과 (나) 색깔에 따른 파장 스펙트럼

화려한 공작새의 깃털에 숨겨진 나노 세상은 어떤 모습일까? 이에 대한 호기심은 오래전부터 있었고, 과학자들은 여러 가지 해석을 제안하였다. 작은 세상을 관찰하고 분석할 수 있는 기술과 장치가 개발됨에 따라 공작새의 비밀은 최근에는 정확하게 밝혀졌다. 〈그림2〉는 중국 후난대학교 물리학과 교수인 구종제 교수가 관찰한 새털 단면의 전자현미경 사진이다. (가)는 깃털의 작은 가지들 길이로 자른 단면이다. 가운데는 연필심처럼 막대가 있고 이 주위를 두께가 2 μm 정도인 원통형 층이 둘러싸고 있다. (나)와 (다)는 외부 층을 고배율로 확대한 사진인데, 각각 푸른색과 갈색을 띠는 깃털의 속모양이다. 둘 다 원형 단면이 사각형으로 밀집되어 있고 그 사이 빈공간이 역시 사각형의 규칙적인 배열(격자, lattice)을 이루고 있다. 깃털의 색에 따라서 크기만 다르다.

푸른색을 띠는 (나)에서 원과 빈 공간의 직경은 각각 약 100nm와 약 55nm이다. 이에 비하여 갈색의 (다)에서는 그 크기가 각각 약 125nm와 약 70nm로 푸른색보다 약간 크다. (라)는 깃털 막대의 수직단면에서 관찰한 것인데, (가)에서 원으로 보이는 것이 500~700nm 크기의 막대임을 알 수 있다. 이 막대의 성분은 손톱과 같은 멜라닌으로 색이 없는 단백질이다. 이것이 바로 공작새가 숨기고 있는 나노 세상의 비밀이다.

직경이 약 100nm 내외이고 길이가 수백 nm인 멜라닌으로 싸여있는 깃털은 어떻게 여러 색깔을 나타낼까? 비밀은 물질에서 빛이 산란되어 서로 간섭되는 자연현상에 있다. 자연광에는 빨강부터 파란색까지 모든 가시광선이 혼합되어 있다. 깃털에 쏘여진 빛은 멜라닌에서 굴절되고 경계면에서 산란된다. 이런 과정에서 〈그림3〉-(가)에서처럼 특정 파장을 가진 빛만 밖으로 반사되면 그 파장의 색으로 나타나는 것이다. 파란 파장의 빛만 밖으로 나오고 다른 빛은 서로 간섭되어 흡수되면 그 깃털은 파랗게 보이는 것이다.

어떤 빛만 밖으로 산란되느냐는 멜라닌 막대의 크기와 중첩된 수에 따라 정해진다. 즉, 〈그림 2〉에서 (나)처럼 막대가 작으면 파란색이 되고, (다)처럼 굵고 크면 갈색이 된다. 이런 결과를 〈그림3〉-(나)에는 깃털의 색에 따라서 가시광선 영역의 반사 스펙트럼으로 표시하였다. 공작새 꼬지깃털에 충천연색 눈망울이 화려한 자태를 내보이는 비밀은 바로 깃털 속에 숨어있는 수백 나노미터 크기의 멜라닌 막대의 격자 배열에 있다.

나노 크기의 산화규소가 영롱한 색 만들어

오팔은 보는 방향에 따라 여러 영롱한 색깔이 연하게 변하는 보석이다. 자연에서 채취



가

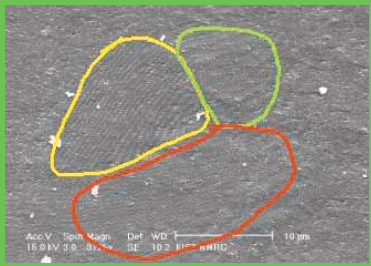
나

〈그림4〉 오팔 사진 (가) 자연석, (나) 반지에 끼워진 오팔

FOCUS 자연 속의 나노

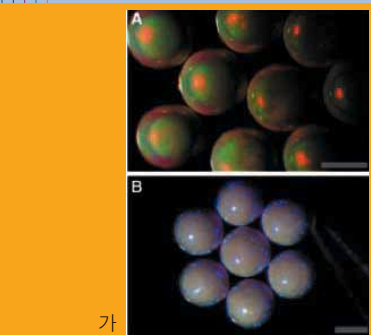


가

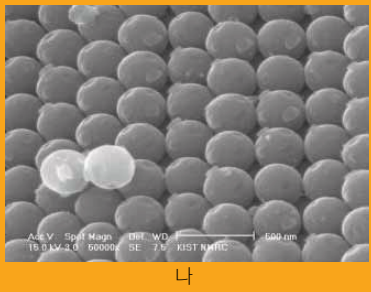


나

〈그림5〉 (가) 자연 오팔의 표면 구조와 (나) 단면에서 다른 색을 나타내는 영역의 격자구조 차이



가



나

〈그림6〉 (가) 인공 오팔, (나) 인공오팔 표면의 라텍스 볼 격자배열

한 원석은 〈그림4〉-(가)처럼 다양한 모양을 갖는데, 이를 예술적인 모양으로 가공하여 반지나 목걸이 등으로 애용된다. 단결정으로 이루어져서 어느 방향에서나 똑같은 광채를 발산하는 대부분의 보석과 다른 특징을 갖는다. 무지개색의 여러 색을 뿜어내는 오팔 속에도 공작새 깃털처럼 구조색을 내는 나노 세상이 숨겨져 있다.

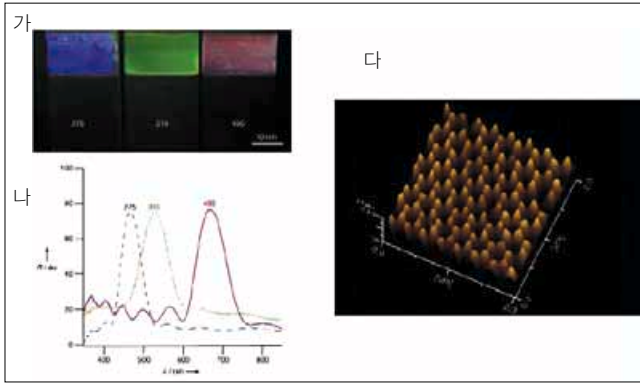
〈그림5〉는 자연산 오팔을 고배율 전자현미경으로 관찰한 사진이다. (가)는 오팔의 표면인데, 규칙적으로 배열된 작은 공이 여러 층으로 중첩되었음을 보여준다. 더 자세히 분석한 결과에 의하면, 둥근 모양은 유리질의 산화규소(SiO_2), 즉 투명한 유리 구슬이다. (나)는 반으로 쪼갠 오팔에서 노랑, 빨강과 연두색으로 보이는 곳을 비교한 사진이다. 색에 따라서 유리구슬의 크기와 정렬 방향이 서로 다를 수 있다. 사진에서 점들이 노란색은 1시 방향으로, 빨간색은 11시 방향으로, 그리고 연두색은 2시 30분 방향으로 정렬되어 있다. 노란색과 연두색 부분을 더 확대해서 보면, 둥근 모양의 직경이 각각 약 300nm와 약 250nm로 차이가 난다. 오팔 속은 색을 띠지 않은 수백 나노미터의 작은 공 모양을 가진 산화규소가 규칙적으로 배열되어 있다. 오팔에서 이런 격자 구조가 가시광선의 파장 영역의 나노 스케일의 크기를 갖기 때문에 특정한 파장의 빛과 반응해서 영롱한 색을 띠는 것이다.

값비싼 오팔을 인위적으로 만들 수는 없을까? 과학자들은 여러 방법으로 인공오팔을 제조하고 있다. 〈그림6〉은 미국 텔라웨어 대학교의 벨레브 교수가 라텍스 입자로 만든 인공오팔이다. (나)는 지름이 각각 270nm인 라텍스 볼이 격자 배열하도록 만든 인공 오팔이다. 최근에는 직경이 약 40nm의 작은 산화규소 입자가 자연산 오팔과 반대 배열을 갖도록 하여 갖은 효과를 얻는 연구가 많이 진행되고 있다. 오팔과 역 배열이란, 〈그림5〉에서 빈 공간을 나노 입자로 채우고 원모양의 산화규소 자리를 공간으로 만든 형태를 말한다. 이런 구조를 역오팔구조(inverse opal structure)라 한다. 빈 공간이 수백 나노미터이고 이 공간이 격자배열을 가지면, 자연산 오팔에서처럼 구조색이 발현되는 원리이다.

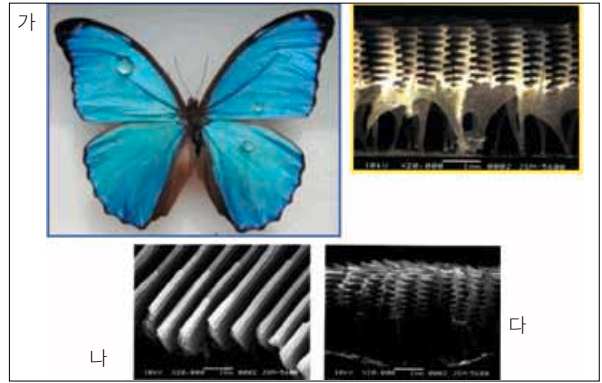
〈그림7〉은 일본의 구 교수 등이 연구한 결과로, 공간의 크기와 배열에 따라서 총천연색을 구현하였다. (가)에서 유리판에 입힌 격자크기가 275nm, 320nm와 400nm에 따라서 각각 파랑, 초록과 주황색을 띤다. (나)는 역오팔 구조의 크기에 따른 스펙트럼이다. (다)는 역오팔 구조의 원자현미경 사진인데, 공간이 6각형 구조로 배열되어 있음을 알 수 있다. 즉, 염료를 가지지 않은 무기물 입자를 나노 스케일로 잘 정렬시키면, 구조색의 효과로 다양한 색을 구현할 수 있다.

수백 나노의 작은 주름이 푸른색 비밀

남미에 사는 모포나비는 눈이 부실 정도로 반짝이는 파란색 날개로 유명하다. 〈그림8〉-(가)의 나비는 암수가 다르고 철에 따라서도 날개색이 변하는 멜리저블루종과는 다르게 날개 전면이 보는 방향에 관계없이 환한 푸른색을 띠는 특징을 가지고 있다. 이런 이유에서 나비 수집가들이 가장 갖고 싶은 시료종의 하나이며 과학자들에게는 오랫동안 호기심의 대상이었다. 최근에는 일본 오사카 대학과 효고 현립대학의 과학자들이 모포



〈그림7〉 (가)와 (나) 역 오팔 구조에 의한 구조색의 구현 (다) 원자현미경으로 관찰한 실리카로 제작한 역오팔 구조



〈그림8〉 (가) 청색 모포나비 사진과 날개를 덮고 있는 비늘의 모양(SEM 사진)으로 (나) 위에서 본 것과 (다) 단면

나비 날개의 푸른색 비밀을 정확히 밝혔고, 첨단 나노 가공기술인 이온빔 집적기술(FIB, focused ion beam)을 이용해서 이를 인위적으로 모사하는데 성공하였다.

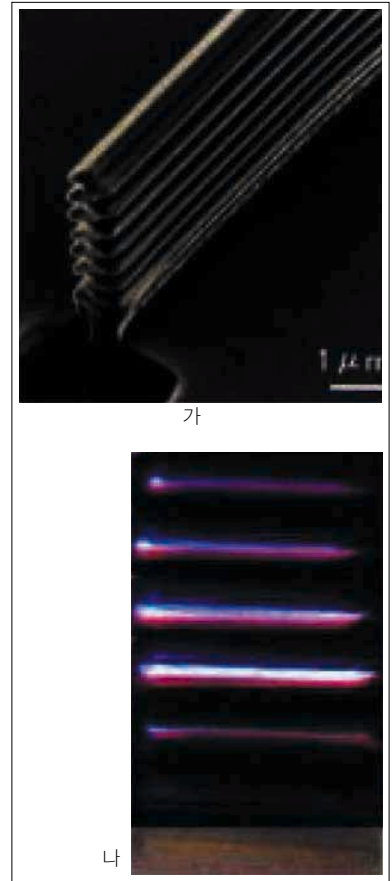
모포나비 날개의 파란색은 날개 표면을 덮고 있는 비늘(phosphate)이 구조색을 띠는 나노구조를 가지고 있기 때문이다. 〈그림8〉-(나)는 비늘을 위에서 본 전자현미경 사진인데, 폭이 약 700nm인 작은 조각 층을 일정한 방향으로 정렬되어 있다. (다)는 비늘을 옆에서 본 모습인데, 전체 크기는 약 2 μ m이고 좌우로 지그재그식 주름이 8개씩 돌아나 있다. 한쪽 주름의 길이는 약 250nm이며, 주름 사이 거리는 약 200nm이다.

수백 나노미터의 작은 주름으로 이루어진 비늘이 푸른색을 나타내는 원인일까? 오사카 대학의 기노시타 교수팀은 반도체 박막성장 및 식각기술(lithography)을 이용하여 나비 비늘과 비슷한 구조적 특징을 가진 모델시험으로 푸른색을 재현시키는데 성공하였다. 유리기판에 반사율이 큰 산화티타늄(TiO₂) 박막(두께 약 80nm)과 반사율이 낮은 실리카(SiO₂) 박막(두께 약 80nm)을 모자이크 식으로 섞어서 8개 층을 적층한 시편을 제작하였다. 이 시료로 보는 방향에 관계없이 전면이 파란색을 구현함으로써, 모포나비의 비밀이 특이한 비늘구조에 있음을 증명한 셈이다.

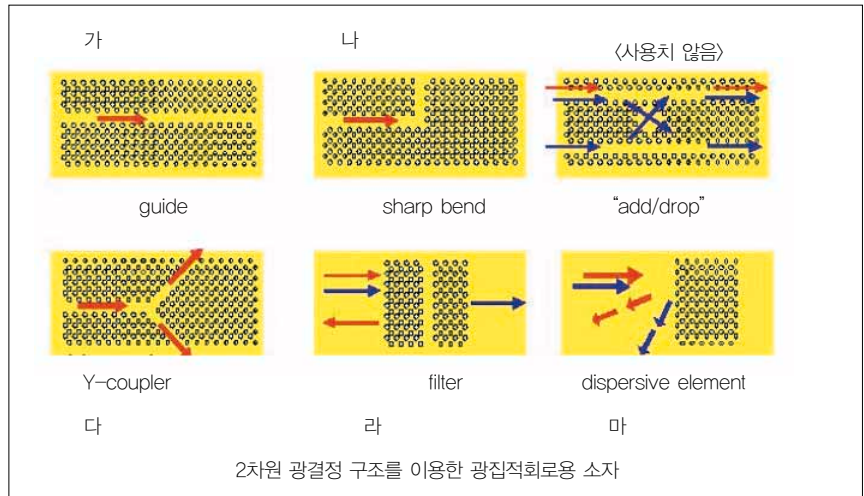
효고 현립대학의 마쓰이 교수팀은 최신 나노 가공기술(FIB)로 이런 가설에 대해 확실하게 증명하였다. 이 기술은 진흙을 칼로 조각하듯이 물질을 이온 빔으로 잘라내는 기술인데, 고에너지로 집속시킨 이온빔으로 나노 스케일까지 작은 형상을 가공할 수 있다. 높이 3 μ m, 주름 간격이 약 200nm인 나비의 비늘과 똑같은 나노 입체 구조를 제작하는데 성공했다(그림9-가). 더욱 훌륭한 것은 인위적으로 제작한 주름 구조에 5~45° 범위에서 어느 각도로 가시광선을 쬐더라도 항상 푸른빛이 나는 것을 확인하였다(그림9-나). 이처럼 모포나비 날개의 푸른 비밀은 화학적 안료가 아니고 바로 나노 크기의 주름 형상을 가진 비늘이 날개를 덮고 있기 때문이다.

구조색 이용, 광결정 소자 개발

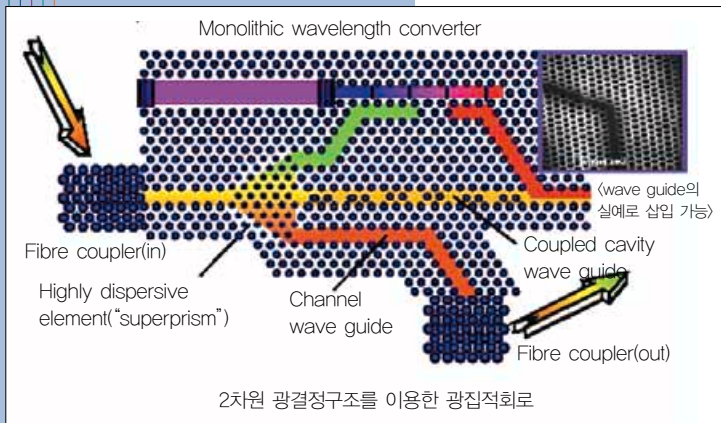
앞에서 설명한 공작새, 오팔과 모포나비가 가진 나노 세상이 펼쳐는 현상에서 배우고



〈그림9〉 (가) FIB 기술로 제작한 나비비늘의 인공구조와 (나) 보는 방향에 따른 푸른색의 발현 모습



〈그림10〉 광결정을 이용한 광도파로의 개념 도형 들



〈그림11〉 monolithic wave converter의 개념도와 반도체 위에 제작한 광도파로의 예

모사하는 첨단 연구 분야에 광결정 연구가 있다. 나노 스케일의 미세 구조에 의한 색 발현에 대하여 정량적으로 해석한 것은 15년 전이다. 빛을 물질내에 구속시키는 현상과 방법에 관한 이론적 근거는 아블로노비치와 세인트 존이 1987년에 발표하였다.

굴절률이 현저하게 다른 두 물질이 주기적으로 배열되어 있어서 특정 파장의 빛을 반사시키는 것을 광결정 (photonic crystal)이라 한다. 광결정에서 빛을 반사하는 파장대역을 광띠틈(photonic band gap)이라 하는데, 이는 반도체에서 전자나 호일 같은 전하운반자에게

특정 에너지 상태를 허용되지 않는 에너지 띠틈(energy band gap)과 유사한 개념이다. 고체 결정체에서는 원자의 주기적 배열에 의해 전자퍼텐셜(쿨롱 퍼텐셜)이 전하운반자의 운동을 주기적으로 제어함으로써, 호일이 허용되지 않는 에너지 띠틈이 생기는 것과 같은 원리이다. 즉, 광결정에서 굴절률이 주기적으로 변화하면 특정 파장 대역의 빛은 통과시키지 않고 반사된다.

아블로노비치와 세인트 존이 이론적 근거를 제시한 광결정 성질은 광통신 등 첨단 정보 분야에 광범위하게 응용될 수 있다. 이런 이유로 1990년 이후 광결정에 대한 첨단 연구가 전세계적으로 활발하게 추진되고 있다. 산업적 활용이 가까이에 있는 대표적인 예에 광도파로(optical wave guide), 발광 소자(light source), 광집적회로(photonic integrated circuits) 등이며, 다양한 광통신 부품에서 현존하는 거의 모든 광소자를 대체하여 경박단소(輕薄短小)화가 가능할 것으로 예상하고 있다.

광결정 이용해 광도파로 소형화

광결정의 가장 기본적인 응용 분야는 광도파로이다. 광도파로란 빛이 정해진 방향으

로 뻗어 나가도록 길을 만들어 주는 광부품인데, 반도체 광도파로나 광섬유가 잘 알려진 예이다. 광섬유는 굴절률이 약간 다른 심지 광섬유와 이를 둘러싼 덮개 광섬유로 구성되어 있으며, 굴절률의 경계면에서 빛이 심지 섬유 내부로 전반사되는 성질을 이용한 것이다. 반도체 광도파로도 같은 원리인데, 도파되는 방향을 급하게 꺾어주면 꺾어진 부분에서 광에너지가 대부분 외부로 소실된다. 광결정 현상을 이용하여 같은 효과를 얻을 수 있다.

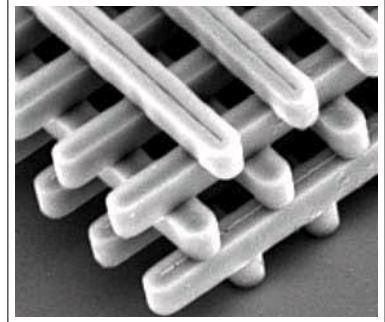
〈그림10〉에 광결정 도파로의 가능성을 도식화하였다. 2차원의 격자구조에서 물이 흐르는 도랑처럼 길을 만들면(그림10-가, 나) 공작새 깃털에서 구조적 색이 반사되는 것처럼, 주기적 물질 배열이 회절 현상을 만들어 정해진 방향으로 빛이 진행한다. 광섬유에서처럼 내부 전반사가 아닌 다른 원리를 이용하기 때문에, 광섬유보다 훨씬 작고 빛의 전달 효율이 높은 도파로를 제작할 수 있다. 전반사를 이용하는 반도체 광도파로로 제작한 Y-커플러라는 소자는 최소 3mm가 필요하다. 〈그림10-나〉처럼 광결정을 이용하면, 3μm로 작게 만들 수 있다. 빛의 방향전환이 전반사와 무관하기 때문에, 〈그림10〉-(다)에서처럼 90도 꺾인 소자의 제조도 가능하다. 광결정의 주기를 바꾸어 주면 반사되는 광의 파장 영역이 달라진다. 이런 현상을 이용하면, 정해진 파장만 통과하는 광필터(그림 10-라) 혹은 모든 빛을 분산시키는 소자(그림 10-마)도 가능하다.

광결정에서 굴절률이 다른 물질의 배열 주기를 잘 선택하면, 기존의 유리 프리즘보다 수백배 큰 분산을 갖는 '슈퍼 프리즘'을 구현할 수 있다. 이런 원리를 이용해서 광통신에서 파장 다중화가 가능하다. 파장 다중화 방식이란 가령 서울에서 수원, 대전, 대구, 부산, 광주에 광신호를 광섬유를 통하여 보내는데 각 도시별로 다른 파장에 정보를 실어 원하는 도시에서 특정파장의 광만 더하거나 빼주는 방식이다. 광결정을 이용한 파장 다중화 방법이 〈그림11〉에 도식화되어 있다. 왼쪽에서 광섬유를 통하여 여러 파장을 가진 빛이 광다중회로에 들어오면, 중간 부분의 광결정 프리즘의 주기적 배열에 따라서 초록색, 주황색과 적색으로 나누어진다. 나누어진 빛은 해당 빛만을 반사시키는 광결정 도파로를 따라서 다른 위치로 진행한다. 오른쪽 아래에 붉은 빛이 이를 검출하는 광섬유로 출력되는 모양이 그려져 있다. 위로 진행한 초록색 빛은 다른 광원에서 들어온 빛과 합쳐져서 파장을 변환할 수 있다. 기존의 광섬유/광반도체 기술로 이런 작업을 하려면, 복잡한 전기-광전환 회로와 연결 기구가 필요하고 전달효율도 크게 떨어진다.

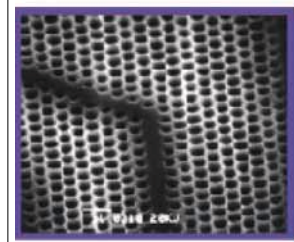
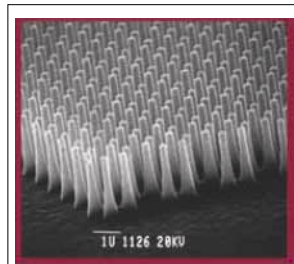
첨단기능 발광소자 개발

광결정의 다른 주요 응용분야는 고효율 저전력 광원의 개발이다. 산업적으로 시장이 크고 기술적인 파급효과가 큰 분야에 발광소자가 있다. 대표적인 예가 포인터로 쓰이는 고체 레이저 소자(LD)와 옥외 광고판에 쓰이는 반도체 발광소자(LED)가 있다. 두 소자 모두 반도체에서 에너지 띠를 제어해서 특정 파장의 빛을 발산하는 공통점을 갖는다. 따라서 휘도가 높은 빛을 발산시키는 것이 이 기술의 중요한 핵심사항이다.

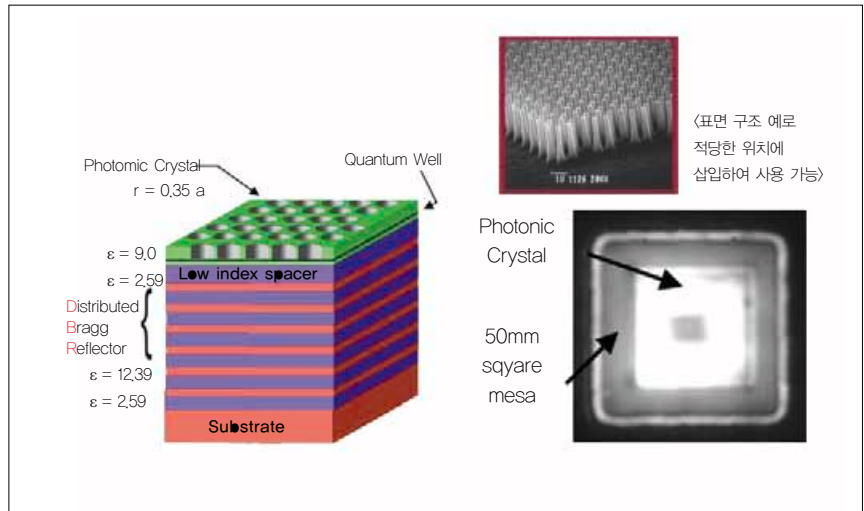
미국 샌디아 국립연구소에서는 나노크기의 실리콘 막대를 목재를 쌓듯이 3차원 광결정 격자구조를 제작하여 일반 전구의 앞에 놓아서, 전구의 밝기를 현저하게 증가시킬 수



〈그림12〉 샌디아 랩에서 제작한 3차원 광결정 구조-가시광 영역의 발광 효율이 현저하게 강화되고, 장파장(발열 영역)의 효율은 현저하게 감소됨



반도체 표면에 제작된 2차원 광결정 구조



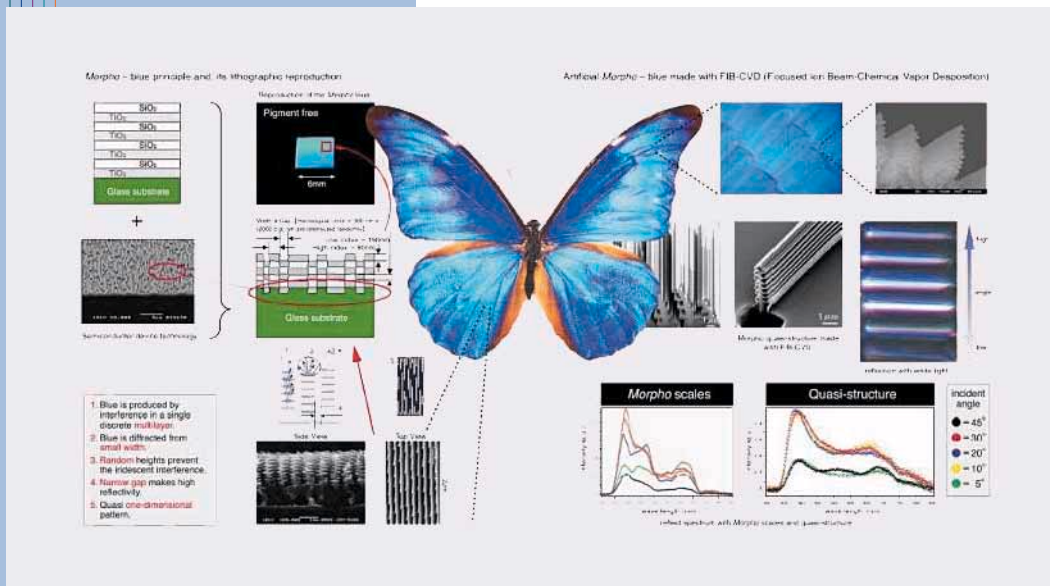
〈그림13〉 LED 표면에 2-D 광결정 소자화에 의한 휘도 향상의 예. 광결정 구조를 LED나 반도체 레이저의 표면에 제작하면 발광 효율이 현저히 증가된다.

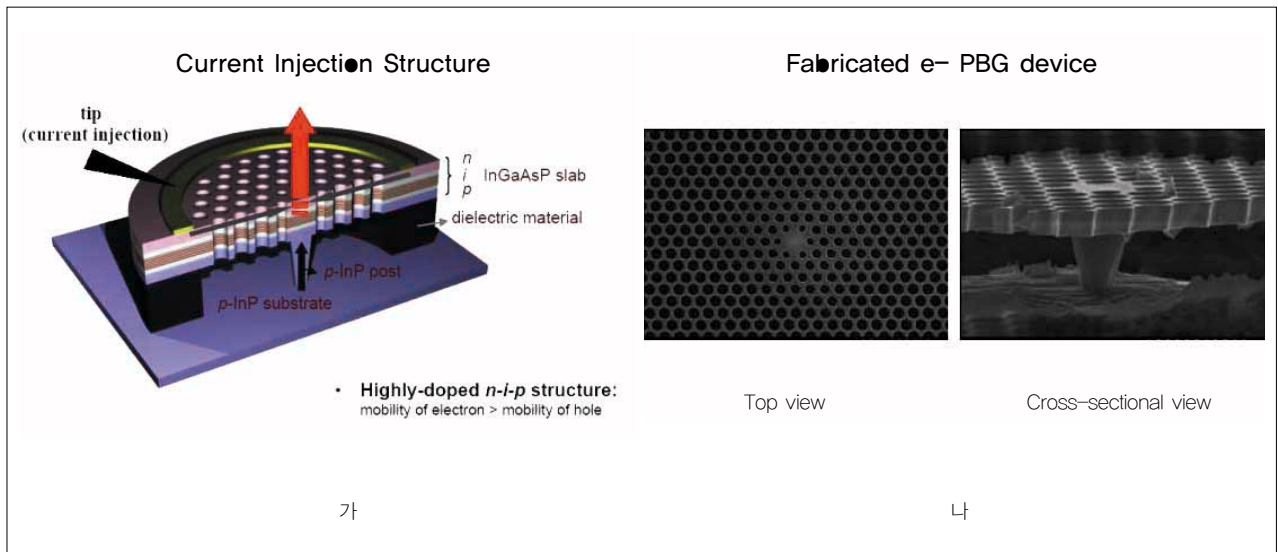
있음을 보여준바 있다. 〈그림12〉-(가)는 텅스텐 필라멘트 전구 앞에 놓인 (나)와 같은 모양의 광결정이 여러 방향으로 산란되는 빛을 앞 방향으로 모아서 휘도를 크게 높인 사진이다. 공작새 깃털에서 멜라닌구조가 특정 파장의 빛만을 발산시키는 것처럼, 공기와 굴절률 차이가 큰 실리콘 막대의 나노구조에 의한 현상이다.

다음은 LED의 발광효율을 6배 증가시킨 연구결과이다. LED의 내부 발광효율은 100%에 가깝지만, 빛이 소자 밖으로 나오면서 반도체에 대부분의 빛이 흡수된다. 이런 이유로 LED 소자 끝에 빛을 모으는 작은 유리렌즈를 붙여서 외부 발광효율을 높이는데, 최대로 약 5% 미만만 쓰이게 된다. 〈그림13〉은 양자우물 구조의 LED 끝에 2차원 광결정을 결합시켜서 외부 발광효율을 약 23%까지 개선시킨 예다. 광결정 구조로 LED의 휘

도를 획기적으로 증가시켜준 결과다.

광결정 구조에서 국부적인 결함이 공진기 역할을 하는 개념을 이용해서 매우 낮은 전류에서도 레이저 동작이 가능한 새로운 광결정 LD도 개발되고 있다. 한국과학기술원의 이용희 교수팀은 이러한 전기로 구동되는 저전력 광결정 레이저





(그림14) KAIST 이용희 교수팀이 개발한 저전력 광결정 레이저 모식도

를 구현하여 최근 세계적인 과학대중잡지인 '사이언스' (2004년 9월 3일자)에 소개한 바 있다. 이를 더 발전시키면 단일 광자 방출소자를 개발하여 양자암호통신에 활용할 수 있으며 기억소자, 기록소자의 개발도 가능하다.

‘전자기결정’ ‘자기광결정’ 등 광결정소자 개발 활발

광결정을 이용한 광소자 제작은 최근에 반도체 나노공정 기술이 발달한 후에야 가능하게 되었다. 개발되었거나 개발이 전망되는 광소자 예로는, 상기한 소자 외에도 광결정 광섬유 분산 보상기, 공진 필터, 편광기, 광 스위치, 기록소자, 기억소자 등 거의 대부분의 정보통신용 광소자가 해당된다.

광결정 이론은 전자파의 모든 파장 영역에 적용 가능하다. 실제로 광결정이 발표된 연구초기에는 제작하기 쉬운 마이크로파(파장이 수cm) 영역에서 실험을 수행하였다. 앞에서 설명한 수백nm 파장의 가시광이나 광통신용 근적외선 영역 외에 휴대전화 등 무선 통신에 사용되는 마이크로파 및 밀리미터파 영역에서도 유사한 기능을 구현하는 연구가 최근 활발해지고 있는데 이 분야에서는 ‘전자기 결정’이라고 부른다.

적외선과 밀리미터파 사이의 파장에 해당하는 미담의 영역인 테라 헤르츠 영역에서의 응용도 기대를 모으고 있다. 전자파가 전파되는 성질은 전기적 굴절률뿐 아니라 자기적 특성으로 정해지는 투과율에 의해서도 영향을 받는다. 따라서 광결정에서 자기적 투과율을 주기적으로 바뀌는 구조도 같은 효과를 낼 수 있다. 이를 ‘자기 광결정’이라 한다.

그리고 광결정 이론은 음파나 지진파, 파도 같은 탄성파에도 적용할 수 있다. 이를 이용한 특정 파장 대역의 음향반사판, 방진 구조물, 방파제 등이 구현되었거나 제안되고 있다. 가령 여름에 매미 소리가 너무 시끄러워 방해가 된다면 매미소리에 해당하는 파장의 음파만 반사시켜주고 햇빛이나 바람, 다른 소리는 잘 통하는 광결정 구조물을 창문에 설치할 수 있다. ㉓



글쓴이 금동화는 서울대 금속공학과 졸업 후 미국 스탠퍼드대에서 박사 학위를 받았다. KISTEP 연구기획관 리더장, KIST 부원장을 역임했다.