



연구책임자 전헌수 교수(02-880-6265) / 교신저자
연구진 이명재 연구원(02-882-9260) / 제1저자

무질서를 이용한 빛의 실용적 제어에 가능성 열려

- 서울대 전헌수 교수팀, 빛을 자유롭게 제어할 새로운 광자학적 상태를 발견 -

- 광학적으로 무질서한 계에서 새로운 광자학적 상태를 발견함.
 - 본 연구팀-서울대학교 물리·천문학부 전헌수 교수 연구팀-은 인위적으로 설계 및 제작이 가능한 무질서한 광학계를 개발하고, 이로부터 빛이 공간적으로 퍼져 있는 상태에서 점차 국소적으로 갇히는 새로운 광자학적 상태를 발견함.
 - 이러한 성과는 앞으로 무질서한 시스템에 대한 물리 현상 연구에 돌파구를 마련해 줄 것으로 기대됨.
- 무질서 계에서 빛을 제어할 수 있는 기제 및 원리를 규명함.
 - 연구팀은 그동안 무질서 연구에서 간과되어 왔던 '결정 구조를 보존한 무질서 계'가 빛의 제어를 위한 열쇠임을 밝힘.
 - 새로운 광자학적 상태는 빛의 제어 가능성과 함께 우수한 공진 특성을 갖고 있어 기존 광학계의 성능개선 및 차세대 광소자 개발이 기대됨.

[붙임] 1. 연구결과 2. 용어설명 3. 그림설명 4. 연구진 이력사항

연구결과

Anderson localizations and photonic band-tail states observed in compositionally disordered platform

Myungjae Lee, Jeongkug Lee, Sunghwan Kim, Ségolène Callard, Christian Seassal, Heonsu Jeon

(Science Advances 4, e1602796 – Published 5 January 2018)

빛의 자유로운 제어는 광학 분야의 매우 중요한 목표임. 하지만 기존의 광학계는 구조적 측면에서 자유도가 한정되어 다양한 수요에 대응하기에는 한계가 있음. 반면 무질서 계는 충분한 자유도를 보장하지만 물리학적 이해가 어려울 뿐만 아니라 광학적 특성을 제어하기 위한 논리와 방법이 모호한 문제가 있음. 본 연구는 구조적 자유도를 충분히 보장하면서도 체계적인 무질서의 설계가 가능한 광자결정 합금 구조를 도입하였으며, 이로부터 새로운 광자학적 고유상태인 띠꼬리(band-tail) 상태의 존재를 실험적으로 입증하고 향후 이를 이용한 빛의 인위적 제어의 가능성을 제시하였음.

연구의 필요성

- 앤더슨 국지화 원리에 의하면 무질서 계에서 빛의 평균산란거리는 무질서 정도에 따라 변함이 알려져 있음. 특히 광자 띠꼬리 상태는 무질서계의 고유상태로서 그에 대응하는 평균산란거리를 쉽게 예측할 수 있기 때문에 빛의 제어에 매우 유용하리라 예상되어 왔음. 하지만 광자 띠꼬리의 존재와 광학적 특성은 아직까지 실험적으로 밝혀지지 않았음.
- 한정된 재료 내에서 무질서 계를 구성하는 것은 결국 물질의 시공간적 배치에 대한 문제로 귀결되며, 무질서한 광학계에 있어서도 구조적 자유도를 확보하기 위한 연구가 진행되었음. 하지만 지금까지 연구

개발된 무질서한 광학계(나노분말, 콜로이드 용액 등)는 빛의 특성을 원하는 형태로 제어하고 발현시키기 어렵다는 근본적인 한계가 있음.

연구내용

- 본 연구팀은 기존의 무질서 광학계가 일정 수준 이상의 무질서도에서는 결정구조가 파괴된다는 것에 주목하여, 무질서도에 관계없이 결정구조가 유지될 수 있는 광자결정 합금계를 개발함. 해당 시스템은 정교한 빛의 제어에 필요한 충분한 수준의 자유도가 확보되면서도 무질서도에 관계 없이 결정구조 자체는 유지됨.
- InAsP/InP 다중양자우물 박막을 사용함으로써 광자결정 합금 구조를 광학적으로 활성화하고, 그로부터 방출되는 빛에 대한 분광학적 특성을 매우 높은 정밀도로 조사함. 그 결과 광자결정 합금계의 고유상태는 광 띠타름(band-gap) 내부에 발현되고 공진파장의 분광학적 범위는 결정구조와 무질서도에 의해 결정됨을, 즉 광자 띠타끼리 상태의 존재를 실험적으로 입증함.
- 광자 띠타끼리 상태의 공간적 전자기장 분포는 약한 국지화와 강한 국지화를 폭넓게 아우르는 다양한 양태를 보이며, 그 유효크기는 빛의 파장보다 작은 수준에서부터 광학계의 전 영역에 이르기까지 매우 광범위함. 특히 본 연구팀은 광자 띠타끼리 상태의 전자기장 집속도가 빛의 공진파장 및 구조의 무질서도에 의해 결정됨을 밝힘.
- 연구팀은 평균산란거리와 Ioffe-Regel factor를 분석하여 광자 띠타끼리 상태가 발현되는 기저 원리는 결정구조에서의 앤더슨 국지화임을 밝힘. 또한 광범위한 광학적 특성에 대한 제어는 광자결정 합금계의 경우 무질서도에 관계없이 결정구조가 유지되기 때문에 가능함을 밝힘.

연구성과

- 기존 연구들은 빛을 제어하기 위한 무질서 광학계의 설계에서 결정 구조의 중요성을 간과하여 왔음. 반면 본 연구팀은 그 중요성을 인지하고 광자결정 합금계를 개발하고 이로부터 광자 띠꼬리 상태를 발견함.
- 광자결정 합금은 개별 격자점에서의 산란강도를 독립적으로 조절할 수 있기 때문에 전체적인 광학계를 픽셀단위로 설계할 수 있고 따라서 광학적 특성에 대한 제어가 체계적이고 용이함. 그리고 광자결정 합금계의 고유상태인 광자 띠꼬리 상태의 경우, 넓은 범위에서 공진 파장과 전자기장 집속도를 제어할 수 있음. 따라서 본 연구의 성과는 광범위한 에너지 영역의 빛을 넓은 시공간 안에서 자유롭게 제어하는 기반 기술을 제공함.
- 또한 본 연구 결과는 광자 띠꼬리 상태에서 발진하는 나노레이저에 대한 관측에 기초하였으며, 나아가 광자 띠꼬리 상태는 일반적으로 매우 우수한 공진특성을 갖고 있음을 증명하였음. 따라서 앞으로 광소자들의 성능을 개선하고 새로운 기능성을 부여하는데 기여할 수 있을 것으로 기대됨.

용 어 설 명

1. 광자결정(photonic crystal) 및 광자결정 합금(photonic crystal alloy)

- 광자결정은 굴절율이 일정한 주기로 반복되는 광자학적 구조물이며, 이때 광자결정을 구성하는 최소 단위인 광원자의 종류를 복수 개로 다양화하여 무질서를 포함한 합금 구조를 구성할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 광자결정 합금 구조를 통해 구조적 자유도는 최대로 확보하면서도 구조적 결정성 자체는 유지함으로써 광학적 특성에 대한 제어 및 설계가 용이하게 하였다.

2. 광 띠틈(photonic band-gap)

- 빛이 광자결정 구조를 통과할 때 굴절율의 주기성으로 인해 전파 특성이 변한다. 특히 빛이 전혀 진행할 수 없는 파장 대역이 존재할 경우 이를 광 띠틈이라 한다.

3. 광자 띠틈 꼬리 상태(photonic band-tail states)

- 무질서한 광학계의 고유상태(eigenstate)로서, 광 띠틈 내부에 발견되며 전자기장의 공간적인 분포 형태가 상태 에너지에 의존하는 것이 특징이다. 그 존재와 광학적 특성이 1987년부터 예견되어 왔으나 아직까지 실험적으로 입증되지 않았었다.

4. 앤더슨 국지화(Anderson localization)

- 구조적 무질서를 포함하는 물리학적 계의 내부에 존재하는 전자나 광자의 공간적 분포가 매우 좁은 영역에 국한되는 현상을 일컫는 용어이다. 필립 앤더슨(Philip Anderson)이 이론적 가능성을 제시하였으며 그 공로로 1977년에 노벨 물리학상을 수상하였다.

5. 다중양자우물(multiple-quantum-wells)

- 전자와 같은 전하 운반자의 움직임을 나노 단위로 제한하여 양자구속효과에 의해 에너지 준위를 양자화하는 구조로서 반도체 물질로 이루어진 박막 구조이다. LED, 레이저 다이오드, 포토 다이오드 등

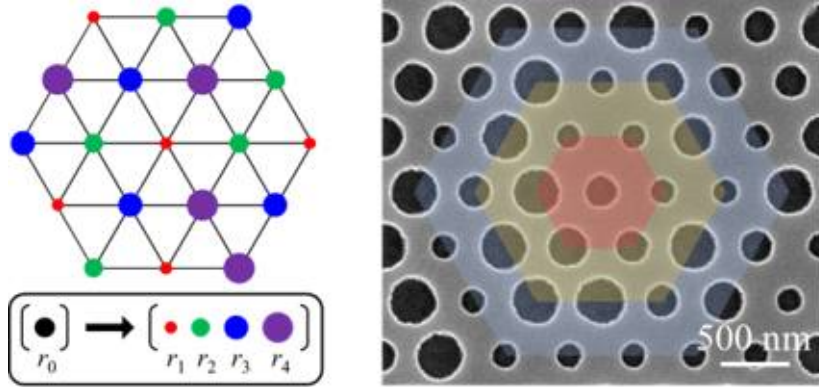
여러 광소자에 사용되고 있다.

6. Ioffe-Regel factor

- 빛의 파수(파장의 역수에 해당)와 평균산란거리를 곱한 값으로서 앤더슨 국지화의 발생 유무를 판단하는 기준이 되는 인수이다.

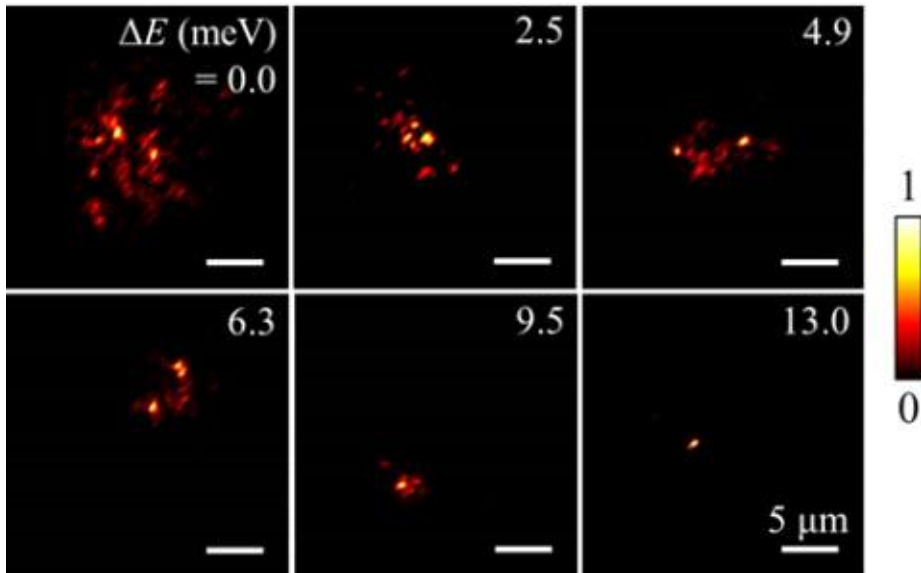
그림 설명

광자결정 합금의 개념도



광자결정 합금계는 빛의 제어에 핵심요소인 결정구조를 유지하면서 광원자의 종류를 다분화하여 정교한 빛의 형상을 구현하기에 충분한 자유도를 확보하는 광학적 무질서계이다. 이러한 계에는 광 띠틈 내부에 새로운 고유상태인 광자 띠꼬리가 발생함을 입증하였다.

광자 띠꼬리의 제어 가능한 광학적 특성



광자결정 합금계의 고유상태인 광자 띠꼬리 상태를 이용해 빛의 공진파장과 전자기장 집속도를 광범위하게 제어할 수 있다. 이러한 유용성은 결정구조 내의 앤더슨 국지화 때문임을 규명하였다.

연구자 이력사항

1. 인적사항

- 이 름 : 전현수 교수
- 소 속 : 서울대학교 자연과학대학 물리천문학부
- 전 화 : 02-880-6265
- E-mail : hsjeon@snu.ac.kr



2. 학력

- 1981 - 1985 서울대학교 학사 (물리학)
- 1985 - 1987 서울대학교 석사 (물리학)
- 1988 - 1994 브라운대학교 박사 (물리학)

3. 경력사항

- 1994 - 1995 브라운대학교 박사후연구원
- 1995 - 1998 SDL, Inc. 연구원
- 1998 - 현재 서울대학교 교수
- 1999 - 현재 서울대학교 반도체공동연구소 레이저연구실장
- 2017 - 현재 서울대학교 자연과학대학 응용물리연구소장

4. 기타 정보

- 서울대학교 연구상 (2011)