

# 손실을 이득으로 바꾸는 폴라리톤 기반의 PT 대칭성 레이저 개발

Polariton-based PT symmetric laser  
turns energy loss into gain

연구책임자: 조용훈    소속학과: 물리학과    홈페이지: <http://qnp.kaist.ac.kr>

정육각형 모양의 반도체 막대 구조 안에서 상호작용이 높은 양자 입자를 생성하여, 손실이 커질수록 발광 성능이 좋아지는 Parity-Time reversal Symmetry (PT 대칭성) 레이저를 개발하는데 성공하였다. 이를 위하여 빛과는 달리 상호작용이 높은 엑시톤-폴라리톤을 이용해 단 한 개의 정육각형 마이크로 공진기 안에 존재하는 서로 다른 모드 사이의 상호작용을 직접적으로 제어하였다. 육각 대칭성을 갖는 단일 공진기 내부에는 에너지가 동일하면서 정삼각형 및 역삼각형 형태의 경로를 갖는 두 개의 광학적 모드가 상호작용 없이 존재하게 되는데, 빛 대신 폴라리톤을 이용하면 엑시톤을 매개로 하여 두 개의 모드 사이에 직접적인 상호작용이 가능하다. 이 중 역삼각형 모드에 대해서만 손실 크기를 연속적으로 조절할 수 있도록 나비넥타이 모양으로 홈이 파여진 기판과 결합했는데, 이를 통해 손실이 증가할수록 작동에 필요한 에너지가 도리어 더 작아진다는 특이한 결과를 상온에서 관측하고 그 원인을 체계적으로 규명했다. 이는 일반적으로 손실이 클수록 작동에 필요한 에너지가 증가한다는 일반적인 직관과는 상반되는 결과로서, 기존에 빛을 이용한 PT 대칭성 시스템의 복잡성과 한계를 극복하고 단 하나의 반도체 마이크로 공진기를 이용해 폴라리톤 기반의 PT 대칭성 레이저를 최초로 구현하였다. 이번 연구를 통해 개발된 PT 대칭성 레이저는 향후 고효율의 레이저 소자부터 양자 광소자에 이르기까지 광범위하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 1. 연구배경

어떠한 물리 시스템에서든 손실(loss)은 가능한 최소화되거나 제거해야 하는 대상으로 인식되어 왔다. 예를 들어, 이득(gain)이 필요한 레이저 시스템에서 손실이 있는 경우에는 작동에 필요한 문턱 에너지가 증가하게 되므로 손실은 가능한 줄여야 하는 대상이었다. 하지만, 양자역학에서 존재하는 PT 대칭성 (parity-time reversal symmetry) 및 붕괴 개념을 수학적 유사성을 통해 광학 시스템에 적용하게 되면, 오히려 손실을 작동에 유익한 방향으로 이용할 수 있는 독특한 광학적 시스템이 가능해진다.

광자로만 구성된 시스템으로 PT 대칭성을 구현하기 위해서는 다음과 같은 까다로운 조건들을 충족시켜야 한다. 기본적으로 광자는 서로 간의 상호작용이 존재하지 않기 때문에, 결합을 매개하기 위해서 공간적으로 분리된 두 개 이상의 광학적 단위구조를 제작해야 한다. 이때, 고유 에너지 (eigenenergy)를 일치시키기 위해서 오차 없이 동일하게 두 구조를 제작해야 하고 이러한 단위구조들에 대하여 손실과 이득을 각각 개별적으로 조절해야 하는 복잡한 제어 과정이 필요하게 된다.

한편, 광자가 진공이나 유전체가 아닌 직접천이형 반도체 내부에 오랜 시간 동안 머물 수 있는 적절한 조건이 성립되면, 반도체 내부의 엑시톤과 광자의 특징을 동시에 갖는 엑시톤-폴라리톤(exciton-polariton)이라는 준-입자를 생성할 수 있다. 엑시톤-폴라리톤은 엑시톤이 갖는 물질적인 성질로 인해 서로 간의 상호작용이 가능해지며, 보즈-아인슈타인 응축현상을 구현할 수 있다. 엑시톤-폴라리톤의 생성 온도는 엑시톤 결합 에너지에 의해서 결정되는데, 대부분의 반도체 물질에서는 열에너지에 의해 엑시톤이 해리되기 때문에 극저온의 실험환경이 필수적인 요소였다. 하지만, 질화물 반도체의 경우 엑시톤 결합 에너지가 상온에서의 열에너지보다 크기 때문에 상온에서도 안정적으로 엑시톤-폴라리톤을 형성할 수 있다.

## 2. 연구내용

이번 연구에서는 기존의 상호작용이 없는 광자를 이용한 PT 대칭성 구현 방식과는 달리, 서로 간의 상호작용이 가능한 엑시톤-폴라리톤을 이용하였으며, 단 한 개의 정육각형 마이크로 공진기 안에 존재하는 축퇴된 서로 다른 고유 모드 (eigenmode) 사이의 상호작용을 직접적으로 제어할 수 있는 독자적인 방법을 고안하였다.

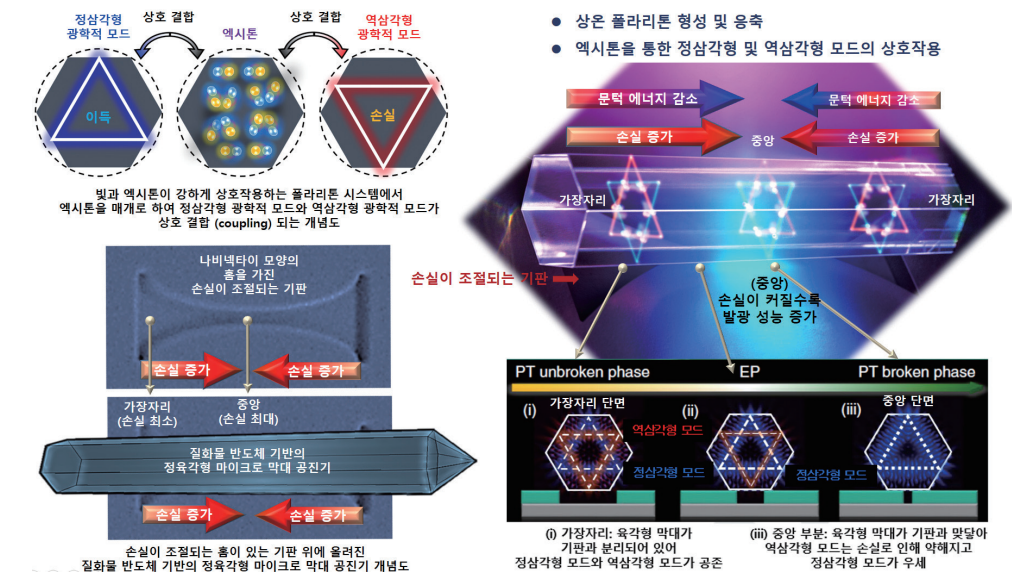
육방정계 (Wurtzite) 결정 구조를 갖는 질화물 반도체를 이용하면 정육각형 대칭성을 갖는 마이크로 막대 구조를 성장할 수 있는데, 정육각형 단면을 갖는 공진기 내부에는 에너지가 동일하면서 정삼각형 및 역삼각형 형태의 경로를 갖는 두 개의 고유 모드가 상호작용 없이 존재하게 된다. 이렇게 질화물 반도체로 제작된 육각 마이크로 막대 구조에서 엑시톤-폴라리톤을 형성하면 엑시톤을 매개로 하여 두 개의 모드 사이에 직접적인 상호작용이 가능할 것이라는 점에 착안했다.

이 중 정삼각형 모드에는 영향을 주지 않으면서 역삼각형 모드에 대해서만 손실 크기를 연속적으로 조절할 수 있도록 나비넥타이 모양으로 홈이 파여진 기판 위에 마이크로 막대 공진기를 올려놓았는데, 이를 통해 기판에 의한 손실이 증가할수록 보즈-아인슈타인 응축 현상에 필요한 문턱 에너지가 도리어 더 작아진다는 특이한 결과를 상온에서 관측하고 그 원인을 체계적으로 규명하였다.

## 3. 기대효과

이는 일반적으로 손실이 클수록 작동에 필요한 에너지가 증가한다는 일반적인 직관과는 상반되는 결과로서, 기존에 빛을 이용한 PT 대칭성 시스템의 복잡성과 한계를 극복하고, 단 하나의 반도체 마이크로 공진기만으로 PT 대칭성 레이저를 최초로 구현했다는 데 의미가 있다. 이와 같은 PT 대칭성을 적용한 시스템은 기존에 제거하거나 극복해야 하는 대상이었던 손실을 역으로 이용해서 결과적으로 이득이 될 수 있게 해 주는 중요한 플랫폼을 제공하는데, 이를 이용하여 기존 레이저의 문턱 에너지를 낮추거나, 비선형 광소자 및 정밀한 광센서 같은 광소자에도 적용될 수 있을 뿐만 아니라 빛의 방향성을 제어할 수 있는 비가역적인 소자나 초유체 기반의 집적회로 양자 광소자 등 신개념 소자에 활용될 수 있다.

그림. 엑시톤-폴라리톤 기반의 PT 대칭성 레이저 개념도



## 연구성과

- 논문** "Room-temperature polaritonic non-Hermitian system with single microcavity", H. G. Song, M. Choi, K. Y. Woo, C. H. Park, and Y. H. Cho\*, Nature Photonics 15, 582 (2021). [Impact Factor = 38.771]
- "Tailoring the potential landscape of room-temperature single-mode whispering gallery polariton condensate", H. G. Song, S. Choi, C. H. Park, S. H. Gong, C. Lee, M. S. Kwon, D. G. Choi, K. Y. Woo, and Y. H. Cho\*, Optica 6, 1313 (2019). [IF = 11.104]
- 수상** 한국과학기술한림원 주관, 에쓰오일 우수학위논문상 (물리학과 분야 대상) 수상 (2021. 12. 2 수상)
- 홍보** Phys.org, 한국광학회 K-Light, 한국물리학회 물리학과 첨단기술 등 다수 소개

## 연구비 지원

정부과제: 한국연구재단 중견연구자지원사업 및 원천기술개발사업, 삼성미래기술육성사업