

저차원 반도체 구조 기반의 양자 나노포토닉스 연구

DOI: 10.3938/PhiT.21.028

조용훈·고석민·공수현

Research of Quantum Nanophotonics Based on Low-dimensional Semiconductors

Yong-Hoon CHO, Suk-Min KO and Su-Hyun GONG

During the last decade, low-dimensional semiconductors have been studied as some of the most interesting subjects in solid-state physics because they show unique electronic and optical properties caused by the quantum confinement effect. Due to their unique properties, low-dimensional semiconductors such as quantum dots (0D), quantum wires (1D), and quantum wells (2D) have been utilized for a wide variety of electronic and photonic device applications. This article presents the characteristics of the low-dimensional semiconductors and their quantum photonic applications, such as nanoscale light-emitting devices, single-photon sources, and exciton-polariton lasers.

들어가는 글

자연에 존재하는 모든 물체는 무수히 많은 원자의 결합으로 이루어지는데, 이런 물체 크기가 특정 방향으로 전자의 드브로이 파장보다 짧아지게 되면 내부의 전자들이 공간적으로 퍼텐셜 벽을 느끼게 되어 전자의 에너지 레벨이 불연속해진다. 또한 물체의 크기가 작아지면 전자가 느끼는 공간의 크기가 작아지게 되고 이로 인해 전자의 에너지 상태가 높아져 넓은 에너지 밴드갭(energy band-gap)을 갖는 현상이 일어난다. 이런 현상을 양자 구속 효과(quantum confinement ef-

저자약력

조용훈 교수는 1997년 서울대학교 물리학 박사로서 2000년부터 충북대학교 물리학과 교수로 재직하였고, 2008년부터 현재까지 한국과학기술원(KAIST) 물리학과 교수로 재직하고 있다. 2005년부터 국가지정연구실(NRL) 단장과 2010년부터 KAIST LED 연구센터 소장을 맡고 있으며, 반도체 기반의 양자 나노포토닉스와 나노 바이오 융합 연구를 수행하고 있다. (yhc@kaist.ac.kr)

고석민과 공수현은 2009년부터 KAIST 물리학과 조용훈 교수 연구실에서 석·박사 통합과정 중에 있다.

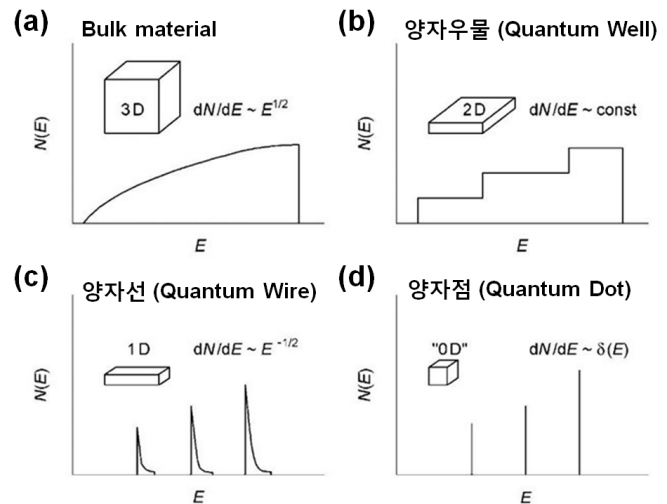


Fig. 1. Density of state of various low-dimensional semiconductors.

fect)라고 하는데, 이 양자 구속 효과로 인해 기존의 벌크(bulk) 물질과는 다른 독특한 전기적, 광학적 특성들을 얻을 수 있다. 또한 물체의 크기가 작아지면 양자 구속 효과뿐만 아니라 강한 전자-전자 쿨롱 상호작용, 터널링 효과와 같이 여러 가지 흥미로운 현상들이 일어나고 물질 내부의 전자구조 또한 변한다. 이와 같은 특성들을 소자에 적용하면 새로운 양자역학적인 특성과 높은 효율을 지닌 전자 및 광소자를 구현할 수 있다. 그리고 위와 같은 소자 구현을 위해서는 나노 크기의 물체가 주는 독특한 특성들에 대한 전기적, 광학적, 구조적 연구가 수반되어야 한다.

이 글에서는 양자 구속 효과를 보이는 저차원 반도체의 종류와 그 특성, 그리고 저차원 반도체 기반의 나노 광소자 응용 및 양자 포토닉스 분야의 연구 주제에 대해 소개하고자 한다.

저차원 반도체와 나노 광소자에의 응용

고체의 물성은 기본적으로 구성 원자, 결정 구조 등에 의해 결정된다. 하지만 물체가 아주 작은 크기, 즉 수 나노미터의 크기를 갖게 될 경우, 물체의 전기적, 광학적 특성이 크기에 의해서도 크게 변화될 수 있다. 이러한 양자 구속 효과는 반도체의 경우 전자뿐만 아니라 전자와 정공의 쌍(electron-hole pair)인 엑시톤(exciton; 정공과 전자가 정전기적으로 구속되

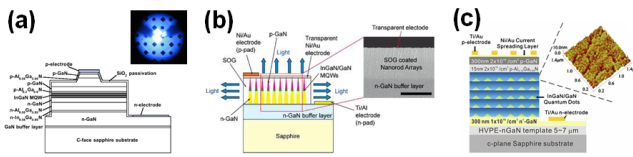


Fig. 2. Photonic devices based on low-dimensional semiconductors; (a) quantum wells,^[1] (b) quantum wires,^[2] (c) quantum dots.^[3]

어 있는 상태)에도 영향을 주게 된다. 반도체의 전기적 성질은 전자와 정공에 의해, 그리고 광학적 성질은 주로 엑시톤에 의해 결정되기 때문에 소자 제작 및 응용을 위해서는 전자와 정공, 그리고 엑시톤이 동시에 고려되어야 한다. 이들 운반자들은 반도체 내에서 3차원 방향으로 모두 구속될 수 있게 되는데, 1차원적으로 구속되어 2차원 방향으로만 운반자들이 자유롭게 움직일 수 있는 구조를 양자우물(quantum well), 2차원적으로 구속된 구조를 양자선(quantum wire), 3차원적으로 모두 구속된 구조를 양자점(quantum dot)이라고 한다. 우리는 이와 같은 양자우물(2D), 양자선(1D), 양자점(0D)을 일컬어 저차원 반도체(low-dimensional semiconductor)라고 부른다. 이들 저차원 반도체에 구속된 엑시톤은 양자 구속 효과에 의해 binding energy가 증가하게 되어 상대적으로 높은 온도에서도 안정된 상태를 유지하게 되므로 소자의 양자 효율을 높일 수 있게 된다.

위와 같이 여러 형태를 띠고 있는 저차원 반도체는 다양한 방법으로 합성, 성장 및 제작이 가능하며 각종 소자에 응용될 수 있다. 일반적으로 소자에 가장 많이 사용되는 것은 양자우물 구조인데, 이는 박막 증착 또는 화학적인 합성으로도 쉽게 얻을 수 있어서 대량 생산이 가능하기 때문이다. 그림 2(a)에 나타나 있는 것처럼, 양자우물은 에너지 밴드갭이 서로 다른 물질을 양자 구속 효과가 나타날 수 있는 수 나노미터 간격의 적층 구조로 증착 또는 합성하여 만들어지는 구조이다. 양자우물을 형성하기 위해서는 밴드갭이 작은 반도체 물질을 상대적으로 밴드갭이 큰 반도체 물질 사이에 넣어 전자가 빠져 들어가 구속되기 쉬운 퍼텐셜 우물(potential well)을 형성한다.^[1]

최근에는 그림 2(b)와 같이 좀 더 높은 양자 효율을 갖는 소자의 개발을 위해 2차원적으로 구속된 양자선 구조가 많이 연구되고 있다.^[2] 일반적으로 양자선은 양자우물보다 광추출 효율이 높는데, 그 이유는 양자우물 구조의 경우 박막 구조에서 일어나는 전반사 효과 때문에 대부분의 빛이 잘 빠져 나오지 못하지만, 양자선의 경우 전반사 효과를 크게 줄여 내부에서 발생한 빛이 높은 확률로 잘 빠져 나갈 수 있기 때문이다. 그 밖에 3차원적으로 구속된 양자점을 이용하는 경우, 그림 1(d)에서 보이는 것처럼 불연속적인 델타 함수 형태의 전자 상태 밀도를 갖기 때문에 낮은 문턱전류 및 낮은 전류 소모를

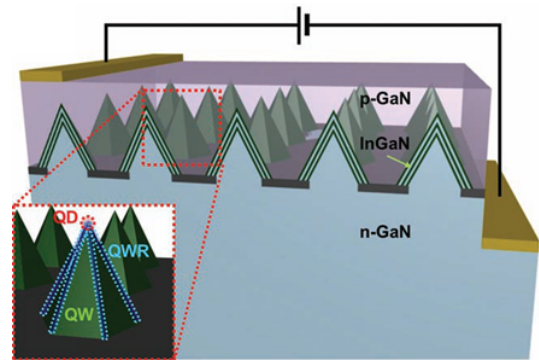


Fig. 3. Quantum well-quantum wire-quantum dot hybrid nanostructures formed on the nano-scale pyramids and its application to an electric-driven light emitting devices.^[4]

갖는 광소자를 구현할 수 있게 된다(그림 2(c)).^[3] 이 때문에 적층 구조 사이의 격자 상수 차이로 인해 자발형성을 하는 Stranski-Krastanow(SK) 양자점에 대한 많은 연구가 진행되고 있다(그림 2(d)).

위에서 언급된 저차원 반도체 양자 구조가 가지는 각각의 장점들을 융합하여 다양한 광소자에 활용하기 위하여 나노 광결정(photonic crystal), 나노 링, 나노 피라미드 구조와 같은 나노 포토닉 복합 구조체에 대한 연구도 진행되고 있다. 예를 들어, 나노 피라미드 구조는 여러 방향의 결정면과 모서리, 꼭지점을 동시에 가지고 있어서, 이 나노 피라미드 구조 위에 밴드갭이 작은 물질로 활성층을 형성하면 피라미드의 빔면에서는 양자우물, 모서리에서는 양자선, 꼭지점에서는 양자점이 형성된 나노 복합 구조를 제작할 수 있다.^[4] 그림 3과 같이 이를 소자화하면 양자우물, 양자선, 그리고 양자점으로 부터 각각 다른 파장의 발광을 얻을 수 있어 무형광체 백색 발광 소자를 구현해 낼 가능성이 있으며, 피라미드 꼭지점에 양자점의 위치를 조절할 수 있는 장점을 살펴 보다 정교한 양자점 기반의 연구도 가능해진다. 이와 같이 저차원 반도체와 포토닉스 융합 기술에 기반을 둔 광소자 설계와 제작을 통하여 LED, 레이저 다이오드, 태양전지, 센서 등의 분야에 적용한다면 신개념의 나노 광소자를 개발할 수 있을 것이다.

REFERENCES

- [1] Daniel Steigerwald, Serge Rudaz, Heng Liu, R. Scott Kern, Werner Gotz and Robert Fletcher, JOM **49**, 18 (1997).
- [2] Hwa-Mok Kim, Yong-Hoon Cho, Hosang Lee, Suk Il Kim, Sung Ryoung Ryu, Deuk Young Kim, Tae Won Kang and Kwan Soo Chung, Nano Lett. **4**, 1059 (2004).
- [3] Meng Zhang, Pallab Bhattacharya and Wei Guo, Appl. Phys. Lett. **97**, 011103 (2010).
- [4] Young-Ho Ko, Je-Hyung Kim, Li-Hua Jin, Suk-Min Ko, Bong-Joon Kwon, Joosung Kim, Taek Kim and Yong-Hoon Cho, Adv. Mater. **23**, 5364 (2011).

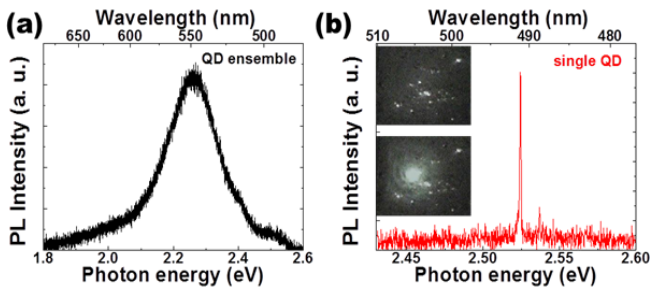


Fig. 4. (a) PL spectrum of the CdSe QD assemble (b) PL spectrum of the single CdSe QD.

저차원 반도체 기반의 양자 포토닉스 연구

‘고체 상태에서 인위적으로 만든 원자(artificial atom in solid state)’라고 불리는 양자점은 삼차원적으로 양자역학적인 구속을 받고 있는 반도체 나노 구조체로서 원자와 같이 불연속적인 에너지 구조를 갖게 되는데[그림 1(d)], 고체 상태에서 ‘빛과 물질과의 상호작용’을 연구할 수 있는 중요한 환경을 제공하게 된다. 이는 그 동안 레이저 포획을 통해 기체 상태의 원자를 연구하던 양자 광학 분야의 접근 방법을 고체 상태인 반도체 양자점 안에 형성된 엑시톤을 이용하여 구현할 수 있도록 해 준다. 따라서 저차원 반도체와 빛과의 약한 상호작용이나 강한 상호작용을 통하여 양자화된 빛을 생성할 수 있게 되므로, 이를 이용하면 양자 포토닉스의 학문적 연구 뿐만 아니라 양자 광학적인 반도체 소자 구현이 가능해져서 많은 관련 연구들을 많이 진행할 수 있다.

1. 단광자 방출기(single photon source)

반도체 기반의 단광자 방출기 제작을 위하여 자발형성 양자점, 나노선 안에 형성된 양자점 등 다양한 구조에 대한 연구가 진행되어 왔다. 최근 주목 받고 있는 나노선 구조에 내재되어 있는 양자점 구조의 경우 응력에 의한 자발형성 양자점과는 달리 단일 양자점 획득이 용이하고 나노선 구조로 인한 광추출 향상을 기대할 수 있다.^[5] 단일 양자점을 포함하고 있는 단일 나노선에 대한 광분석을 하면 양자점 집단에서의 넓은 발광 스펙트럼과 달리 매우 작은 반폭을 가지고 있는 단일 양자점 피크를 관찰할 수 있다(그림 4). 이는 원자에서의 불연속적인 에너지 상태를 반도체 단일 양자점에서 구현될 수 있음을 보여주는 예라고 할 수 있다.

단광자 광원의 경우 열광원 또는 레이저와 같은 광원과는 달리 고전적인 전자기학으로는 설명할 수 없는 특성을 갖는데, 대표적인 특징이 anti-bunching과 광자 간 sub-Poisson 분포이다. 이를 검출하기 위해서는 광자간 시간 간격을 측정하기 위한 Hanbury Brown-Twiss(HBT) 셋업이 필요하다. 그림

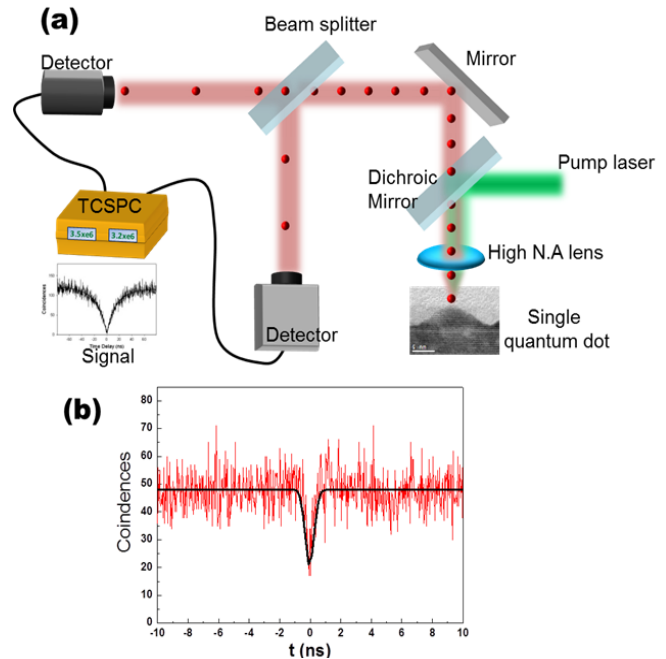


Fig. 5. (a) Scheme of the Hanbury Brown and Twiss experimental setup (b) Anti-bunching signal from the single quantum dot emission.

5(a)에서와 같이 두 개의 광검출기 그리고 광검출기 간 광자 도착 시간 간격을 측정할 수 있는 time-correlated single photon counting 장치를 이용하여 광자 간 상관 관계(correlation)를 측정할 수 있다. 광자 상관 관계 측정은 두 개의 광검출기에서 각각 광자의 도착시간을 측정, 비교하여 광자 간 시간 분포를 측정하게 되는데, 고전광원의 경우 광자들이 시간적으로 두 개 이상 묻혀 있는 경우가 많아 두 개의 광검출기에 광자의 동시 도착(지연 시간 0) 확률이 높고, 레이저와 같은 결맞은 광원의 경우, 광자의 시간분포가 Poisson 함수를 띠고 있어 두 검출기에서 측정되는 광자 간 지연시간이 랜덤한 분포를 띠게 된다. 반면 양자광원이라 할 수 있는 단광자 광원의 경우 광자 분포가 일정하게 떨어져 있어 (anti-bunching) sub-Poisson 분포를 갖게 되고 광자 상관 관계 측정 시 두 광검출기 사이의 지연 시간 0에서 이차 상관 관계 값이 1보다 작아지는, 즉 두 개의 검출기에 빛이 동시 도착하지 않는 특성을 나타낸다[그림 5(b)]. 이러한 광자 상관 관계 분석을 통해 광원에서 나오는 빛의 양자화 정도를 파악할 수 있게 된다. 최근 이들 저차원 반도체를 이용한 단광자 방출기에서 단광자 방출 및 검출 효율을 증가시키기 위한 새로운 나노 구조에 대한 연구가 활발하다.

REFERENCES

- [5] Adrien Tribu, Gregory Sallen, Thomas Aichele, Regis Andre, Jean-Philippe Poizat, Catherine Bougerol, Serge Tatarenko and Kuntheak Kheng, Nanoletters **8**, 4326 (2008).

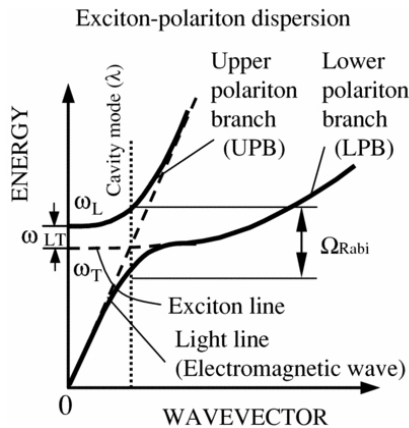


Fig. 6. Dispersion curve of the exciton polariton.^[6]

2. 엑시톤 폴라리톤(exciton polariton)

엑시톤 폴라리톤이란 엑시톤(exciton)과 빛(photon)의 강한 상호작용(strong coupling)에 의해 생겨난 준입자(quasi-particle)이며 공진기 폴라리톤(cavity polariton)이라고도 불린다. 빛이 엑시톤과 섭동(perturbation) 형태의 상호작용이 아닌, 그림 6에서와 같이 엑시톤의 분산곡선과 공진기 안의 빛의 분산곡선이 운동량이 0인 부근에서 anti-crossing하여 upper polariton state와 lower polariton state라는 새로운 고유상태(eigenstate)가 생겨나게 된다. 빛이 강한 상호작용을 하기 위해서는 빛을 구속시켜 주는 공진기의 역할이 중요한데, 주로 반도체 양자우물 구조 앞뒤에 distributed Bragg reflector (DBR)에 의한 빛의 반사를 이용한 공진기가 많이 쓰인다.

엑시톤 폴라리톤 분야가 최근에 많이 연구되는 이유는 엑시톤 폴라리톤이 보존(boson)의 특성을 따르기 때문이다. 또한 엑시톤과 빛의 준입자이기 때문에 유효질량이 원자에 비하여 상당히 작다. 따라서 기존의 원자 상태에서 연구하던 Bose-Einstein condensation(BEC), quantum fluid 등의 연구를 저차원 반도체의 엑시톤 폴라리톤에 대하여 비교적 높은 온도인 수 K 정도에서 연구되었으며[그림 7], 나아가 상온에서도 실현 가능할 것으로 보고 있다.

또한 엑시톤 폴라리톤의 독특한 분산곡선으로 인해 일반 포톤레이저와 달리 분포역전(population inversion)이 일어나지 않아도 자발방출로 결맞는 빛을 얻을 수 있어 폴라리톤 레이저라고 불리고 있다. 이 현상은 분포역전이 일어나기 전에 일어나기 때문에 포톤레이저의 문턱전류보다 낮은 전류에서 일어나 기존의 포톤레이저의 한계를 극복할 수 있어 최근 활발히 연구되고 있다. 하지만 엑시톤 폴라리톤의 lifetime은 수 ps 정도로 굉장히 짧아서 엑시톤 폴라리톤이 바닥상태에 도달하기 전에 공진기 밖으로 빠져나간다는 한계가 있다. 엑시톤 폴라리톤의 lifetime은 공진기 안에서의 빛의 손실에 의존하

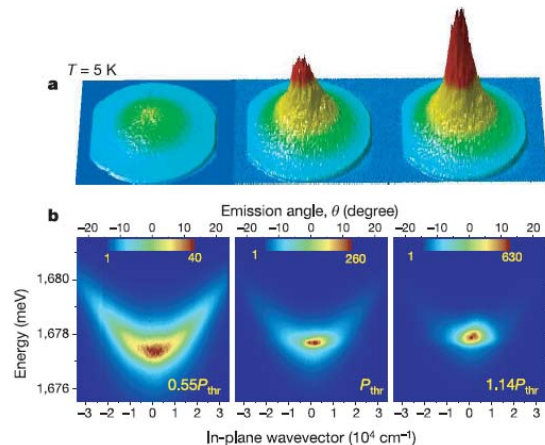


Fig. 7. Observation of Bose-Einstein condensation in exciton polariton.^[7]

로 높은 quality factor를 갖는 공진기로 짧은 lifetime을 극복할 수 있다. 기존의 DBR 거울을 이용한 Fabry-Ferot 공진기 대신에 전반사를 이용한 whispering gallery mode (WGM)를 이용하여 공진기를 이용하면 이론적으로 더 높은 quality factor를 갖는다고 알려져 있다. 특히 엑시톤 결합에너지가 큰 물질인 GaN와 ZnO는 wurtzite 구조이어서 나노막대 및 마이크로막대를 성장하게 되면 자발적으로 육각기둥모양으로 성장이 되므로, 반도체 구조 자체로 WGM 공진기가 형성되어 상온 엑시톤 폴라리톤 레이저 연구에 적합할 것으로 기대되고 있다.

맺는 글

최근 기존의 백열등과 형광등을 대체할 수 있는 고효율 친환경 광소자를 만들기 위한 광반도체 연구들이 활발히 진행되고 있다. 특히 양자우물, 양자선, 양자점 등의 저차원 반도체 양자구조를 도입함으로써 높은 양자효율을 달성할 수 있다. 이제 한 걸음 더 나아가 고품질 반도체 성장과 나노공정 기술의 발달에 힘입어 반도체에서 양자 광학적인 현상을 실험적으로 관측할 수 있게 되면서, 상온에서 작동하고 전기로 쉽게 구동되며 초소형으로 소자화가 가능한 저차원 반도체 기반의 양자 포토닉스 시대를 열어가고 있다.

REFERENCES

- [6] S. F. Chichibu, A. Uedono, A. Tsukazaki, T. Onuma, M. Zamfirescu, A. Ohtomo, A. Kavokin, G. Cantwell, C. W. Litton, T. Sota and M. Kawasaki, *Semicond. Sci. Technol.* **20**, S67 (2005).
- [7] J. Kasprzak, M. Richard, S. Kundermann, A. Baas, P. Jeambrun, J. M. J. Keeling, F. M. Marchetti, M. H. Szymanska, R. Andre, J. L. Staehli, V. Savona, P. B. Littlewood, B. Deveaud and Le Si Dang, *Nature* **443**, 409 (2006).