

펄스 레이저 분광학을 이용한 나노 및 위상 물질의 초고속 빛-물질 상호작용 연구

심 상 완

Center for Integrated Nanotechnologies,
Los Alamos National Laboratory, New Mexico, USA

빛과 물질은 자연 속에서 끊임 없이 상호작용 하며 이를 통해 인간은 물질을 관측하고 이해한다. 더 나아가 레이저와 같은 특수한 빛의 발견은 물질의 상태를 빛을 이용하여 인위적으로 제어할 수 있게 하였다. 최근 등장한 나노 및 위상 물질과 같은 우수한 물성의 양자 물질은 이러한 레이저 기술의 발전과 더불어 새로운 형태의 빛-물질 상호작용을 가능하게 하며, 이는 정보 및 센서 기술과 같은 다양한 분야에서 기존의 한계를 뛰어넘는 혁신을 견인한다. 펄스 레이저를 이용한 초고속 시간-분해 분광학은 이러한 빛-물질 상호작용 연구에 필수적인 도구로 마치 동영상을 녹화 하듯 가장 직관적인 방식으로 빛과 물질의 동역학 관측을 가능하게 한다.

본 발표에서는 나노 및 위상 물질 영역에서 각각 대표적 물질로 여겨지는 2차원 반도체와 위상 절연체의 초고속 빛-물질 상호작용을 논한다. 첫 번째 카테고리인 2차원 반도체 연구에서는 펄스 레이저 분광학을 이용하여 탐구한 빛과 엑시톤의 초고속 상호작용 연구를 제시한다. 엑시톤은 빛에 의해 여기된 전자와 정공이 서로 속박되어 형성된 준입자로 반도체의 광반응을 결정하는데 있어서 핵심적인 역할을 한다. 2차원 반도체는 저차원성과 독특한 결정 대칭성에 의해 빛의 편광으로 선택적 접근이 가능하고 안정적인 엑시톤 준위를 가져 독특한 빛-물질 상호작용을 나타낸다^{1,2}. 본 연구에서는 먼저 2차원 반도체 엑시톤의 가시광선 및 중적외선 영역에서의 엑시톤 상호작용, 브로드닝, 내부 전이 등 기초적인 동역학적 성질을 논의한다^{3,4}. 이러한 기초 연구에서 더 나아가 레이저 펄스를 이용해 순간적으로 엑시톤의 에너지 준위를 제어하고⁵ 엑시톤 간의 양자 비트를 발생시키는 결맞음 빛-물질 상호작용에 대해 연구한다⁶. 이와 같은 일련의 연구는 2차원 반도체의 빛-물질 상호작용이 미래의 양자 정보 소자 및 초고속 광소자로서의 높은 응용가능성을 가짐을 입증한다.

두 번째 카테고리인 위상절연체 연구에서는 디락 전자와 테라헤르츠 빛의 상호작용에 대해 논의한다. 물질의 위상은 고체를 나누는 새로운 기준으로, 기존의 대칭성에 의해서는 설명할 수 없는 많은 양자 현상에 대한 이해를 가능하게 한다. 위상절연체는 물질의 위상에 나타나는 대표적인 독특한 고체 상태로, 내부는 일반적인 절연체이나 표면에는 에너지 갭이 없는 디락 전자 구조를 나타낸다⁷. 특히, 표면의 전자는 시간 역전 대칭성에 나선형의 스핀 구조를 가지며 이로 인해 후방 산란이 금지되는 우수한 물성을 갖는다. 본 연구에서는 초고속 광-펌프 테라헤르츠-프로브 분광학을 통해 디락 전자의 산란 동역학 및 내부 포논과의 상호작용과 같은 위상절연체의 기초적

인 광동역학적 이해를 확립한다^{8,9}. 이러한 기초를 바탕으로 한 위상절연체 광소자 연구를 통해 테라헤르츠에 펄스에 의해 발생한 디락 플라즈몬이 근적외선 펄스에 의해 기존의 한계를 뛰어넘는 초고도의 효율로 제어 될 수 있음을 입증하고^{10,11}, 더 나아가 위상절연체가 테라헤르츠 메타소자 및 초고속 광전류 소자로 응용 가능함을 보인다^{12,13}. 이러한 일련의 연구는 주로 기초연구의 영역에서 머물러 있던 위상 물질의 새로운 광학적 응용 가능성을 찾아내고 발전 방향을 제시했다는 데에서 큰 의미를 갖는다.

마지막으로, 지금까지 논의된 2차원 반도체와 위상절연체의 연구가 서로 완전히 분리된 것이 아니라 다양한 방식으로 결합되어 새로운 연구 가능성을 제시할 수 있음을 논한다¹⁴. 이러한 나노 및 위상 물질에 대한 일련의 연구는 초고속 레이저 분광학이 다양한 양자 물질에서의 빛-물질 상호작용을 이해하는데 필요한 강력한 도구임을 말해주는 동시에 기존의 한계를 뛰어넘는 초고속 광학 기술의 근본 원리를 제공한다.

참고 문헌

1. Mak, K. F. *et al.*, Atomically Thin MoS₂: A New Direct-Gap Semiconductor. *Phys. Rev. Lett.* **105**, 136805 (2010).
2. Mak, K. F. *et al.*, Control of valley polarization in monolayer MoS₂ by optical helicity. *Nature Nanotechnol.* **7**, 494 (2012).
3. Sim, S. *et al.* Exciton dynamics in atomically thin MoS₂: Interexcitonic interaction and broadening kinetics. *Phys. Rev. B* **88**, 75434 (2013).
4. Cha, S. *et al.* 1s-intraexcitonic dynamics in monolayer MoS₂ probed by ultrafast mid-infrared spectroscopy. *Nature Commun.* **7**, 10768 (2016).
5. Sim, S. *et al.* Selectively tunable optical Stark effect of anisotropic excitons in atomically thin ReS₂. *Nature Commun.* **7**, 13569 (2016).
6. Sim, S. *et al.* Ultrafast quantum beats of anisotropic excitons in atomically thin ReS₂. *Nature Commun.* **9**, 351 (2018).
7. Hasan, M. Z. *et al.*, Colloquium: Topological insulators. *Rev. Mod. Phys.* **82**, 3045 (2010).
8. Sim, S. *et al.* Ultrafast terahertz dynamics of hot Dirac-electron surface scattering in the topological insulator Bi₂Se₃. *Phys. Rev. B* **89**, 165137 (2014).
9. Sim, S. *et al.* Tunable Fano quantum-interference dynamics using topological phase transition in (Bi_{1-x}In_x)₂Se₃. *Phys. Rev. B* **91**, 235438 (2015).
10. Sim, S. *et al.* Ultra-high modulation depth exceeding 2,400% in optically controlled topological surface plasmons. *Nature Commun.* **6**, 8814 (2015).
11. Sim, S. *et al.* Composition control of plasmon-phonon interaction using topological quantum-phase transition in photoexcited (Bi_{1-x}In_x)₂Se₃. *ACS Photonics* **3**, 1426 (2016).
12. In, C. *et al.* Control over electron-phonon interaction by Dirac plasmon engineering in the Bi₂Se₃ topological insulator. *Nano Lett.* **18**, 734 (2018).
13. Lee, J. *et al.* Role of spin Hall effect in the topological side surface conduction. *ACS Photonics* **5**, 3347 (2018).
14. Cha, S. *et al.* Generation, transport and detection of valley-locked spin photocurrent in WSe₂-graphene-Bi₂Se₃ heterostructures. *Nature Nanotechnol.* **13**, 910 (2018).