

시공간 경계를 이용한 빛의 선형 주파수 변환 기술 개발

기계공학과
민 범 기



빛의 주파수 변환 기술은 거의 모든 경우, 비선형 물질이나 소자를 이용하여 개발되어 왔다. 본 연구에서는 이러한 기존 접근 방법에서 벗어나 전자기파가 매질의 시간 경계를 지나는 경우, 비선형성에 의존하지 않는 선형적 주파수 변환이 생기는 점에 착안하여 설계가 가능한 선형 주파수 변환 소자를 최초로 구현하였으며, 더 나아가 변환된 빛의 위상 역시 제어가 가능함을 보였다. 제안된 기술은 매우 낮은 입력 세기를 가지는 빛 주파수 변환을 가능케 할 것이며, 더불어 변환된 빛의 위상 제어 가능성은 새로운 광학 파면 제어 기술로 발전될 것으로 기대된다.

KAIST'S TOP 10 RESEARCH ACHIEVEMENTS OF 2018



- 지난 20여 년간 진행된 메타물질 연구는 마이크로/나노 공정의 도움으로 파장 이하 스케일에서 유효 매질의 공간적인 변화 (공간 구조체)를 극한까지 이용하였다. 하지만, 일반적으로 구현된 메타물질의 성질은 시간 영역에서 변하지 않거나 상호작용하는 전자기파의 진동 주파수에 비해 느린 시간 영역에서 변하는 한계를 가지고 있었다. 최근 2~3년간, 극소수의 선도적인 연구자들에 의해 유효 매질의 시간적인 변화 (시공간 구조체)를 이용하여 시간적으로 고정된 유효 물성의 한계를 극복하고 메타물질의 기능적인 유효 물성을 더욱 넓히려는 연구가 태동되었다. 매질의 시간적인 특성 변화를 이용하여 광학 물질 더 나아가 광학 소자의 기능을 넓히고자 하는 접근 방법은 빛의 비가역적 투과 (Nonreciprocal transmission)와 시간 역행파의 생성에 관한 연구 등에서 찾아볼 수 있다. 본 연구는 시변 매질을 이용한 또 다른 시도로 전자기파의 주파수 변환에 관한 연구이다. 일반적으로 주파수 변환은 비선형 (메타)물질이나 (메타)소자를 이용하여 구현되었으나, 전자기파의 주파수 변환은 시변 물질과 전자기파의 상호작용을 통하여도 얻어질 수 있다. 물질의 급격한 공간적 물성 변화, 즉, 공간적 경계면 (Spatial boundary or discontinuity)을 빛이 지나가는 경우, 빛의 운동량 (파수벡터)은 보존되지 않으나 빛의 에너지 (주파수)는 보존된다. 반면, 빛이 물질의 급격한 시간적 물성 변화, 즉, 시간적 경계면 (temporal boundary or discontinuity)을 지나는 경우, 빛의 에너지 (주파수)는 보존되지 않으나 빛의 운동량 (파수벡터)은 보존된다. 이러한 원리는 대칭성과 보존량에 대한 관계를 기술하는 뇌터 정리 (Noether's theorem)에도 부합한다. 따라서, 시변

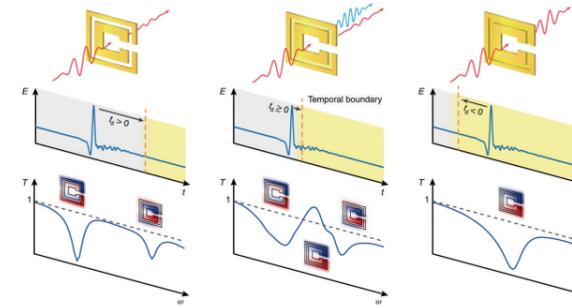


그림 1. 시간 변화 메타표면을 이용한 주파수 변환의 개념도과정

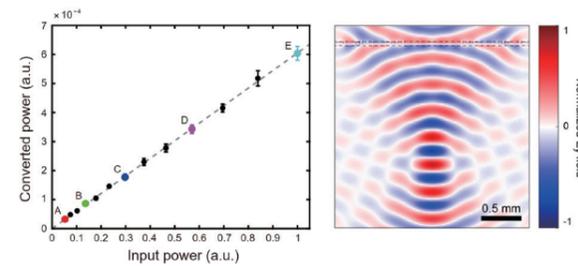


그림 2. (좌) 주파수 변환량의 선형성 (우) 메타 원자 각각의 위상 제어를 통한 변환 주파수 성분 집중

또는 시공 변화를 가진 매질을 이용하면 주파수 변환을 효과적으로 얻을 수 있다.

- 본 연구에서는 시공간 경계면을 구현하기 위하여 능동적으로 변화 가능한 메타표면을 이용하였다. 메타표면, 특히 금속 메타원자로 구성된 유효 표면은 능동적으로 빠르게 변화 가능한 물질과 결합 시 섭동적인 영역을 벗어나는 커다란 시간 경계면을 구현하는 데에 이상적이다. 보다 구체적으로 초고속 광학적 여기 (Ultrafast optical excitation)에 의해 전도성이 계단식으로 변화되는 반절연성 (Semi-insulating) GaAs 위에 테라헤르츠 대역에서 2개의 기본 공진모드를 가지는 금속 메타 원자를 설계하였다. 제작된 소자가 광학적으로 여기되는 경우, 2개의 기본 공진모드가 1개의 합병된 공진모드를 가지게 되어 주파수 대역에서 분산적인 시공간 경계면이 형성되도록 하였다.

입사하는 테라헤르츠 대역 전자기파가 광학적 여기에 의해 생성된 시간 경계면과 상호 작용하는 경우, 주파수 변환이 일어나며 입사파의 세기와 변환된 전자기파의 세기가 선형적인 관계가 있음을 실험적으로 증명하였다. 이러한 실험적 결과는 이론적인 계산과 수치해석적인 검증을 통하여 검증되었으며 선형적 주파수 변환의 메커니즘을 명확히 하였다. 이론적인 계산을 통하여 상대적 주파수 변화량과 변환효율의 곱이 일정한 것을 보임으로써 선형적 주파수 변환의 변환 효율의 최대치를 이론적으로 밝혀내었으며, 선형적 주파수 변환에 있어 주파수의 상향 변환 (Up-conversion) 및 하향 변환 (Down-conversion) 모두 가능함 또한 보였다. 제안된 주파수 변환 기술은 기존의 광학에서 이용되던 비선형 주파수 변환 소자에 비하여 새로운 주파수 성분의 생성에 있어 훨씬 더 높은 자유도를 가지게 된다. 또한, 변환된 주파수 성분의 위상 역시 시간 경계면의 위치를 조절함으로써 제어가 가능함을 보였다. 이러한 위상 제어 가능성은 변환된 전자기파의 파면제어에 응용 가능할 것이다.

- 본 연구에서는 메타표면의 시공간 경계를 설계할 수 있는 방법론을 제시하였을 뿐만 아니라 이에 관한 독자적인 해석 이론을 제시하였다. 즉, 기존의 시변 매질 연구 분야에서 이론적으로만 탐구되어 오던 매우 급격하게 변화하는 물성을 구현할 수 있는 방식을 메타표면을 이용해서 증명하였을 뿐만 아니라 이를 이용하여 주파수 변환을 세계 최초로 관측하였다. 제안된 선형적 주파수 변환 방식은 기존의 테라헤르츠 비선형 기반의 주파수 변환 방식에서 얻어진 가장 높은 변환 효율과 비등한 결과를 보여주었다. 학술적으로는 독립적인 두 연구 분야였던 시변 매질과 메타표면 연구를 접목하여 새로운 연구 방향을 제시하였으며, 기술적으로는 강한 빛을 사용할 수 없는 신호처리 및 통신 분야에 적용할 수 있을 것으로 예상된다. 따라서, 새로운 개념의 주파수 변환 소자에 관한 시장을 선점할 수 있는 기술이라 생각하며, 기존의 비선형성 기반의 광학 소자를 시변 매질 기반의 소자로의 대체 할 수 있을 것이라 예상된다.

연구성과

[논문] • Kanghee Lee, Jaehyeon Son, Jagang Park, Byungsoo Kang, Wonju Jeon, Fabian Rotermund, and Bumki Min, "Linear frequency conversion via sudden merging of meta-atoms in time-variant metasurfaces", *Nature Photonics* 12, 765-773 (2018) [IF = 32.521]
 • Teun-Teun Kim, Sangsoo Oh, Hyeon-Don Kim, Hyun Sung Park, Ortwin Hess, Bumki Min, and Shuang Zhang, "Electrical access to critical coupling of circular polarized waves in graphene chiral metamaterials", *Science Advances* 3, e1701377 (2017) [IF = 11.51]
 [기조 강연] Bumki Min, "Rapidly time-variant metadevices for linear frequency conversion", SPIE Optics+Photonics 2018, San Diego, http://spie.org/newsroom/op18_landing/op18_min