

1. 서론

전자기적 메타물질은 전자기파와의 상호작용이 원하는 특성을 나타내도록 인공적으로 설계, 제작된 구조를 말한다. 사용하고자 하는 전자기파의 파장보다 훨씬 더 미세한 공간적 구조를 가지며, 유사한 주파수대에서 전자기파의 전기장과 자기장 모두에 공명 반응을 나타내는 특징을 갖는다. 2000년에 Pendry는 유전율(dielectric permittivity) ϵ 과 투자율(magnetic permeability) μ 가 모두 음의 값을 갖는 메타물질에 대한 논문을 발표하였다 [1]. ϵ 과 μ 가 동시에 음의 값을 갖는 매질에서는 굴절률 n 역시 음의 값 $-\sqrt{\epsilon\mu}$ 를 갖도록 선택해야 한다 [2]. 이런 성질을 갖는 음굴절률(negative index) 메타물질을

메타물질의 설계 및 제작이 가능해져서 그에 관한 활발한 연구가 진행되고 있다.

메타물질에 관한 연구 결과들이 축적되면서 최근 수년 사이에 강한 광학적 비선형성을 갖는 비선형 메타물질에 대한 연구자들의 관심이 급증하고 있다 [13]. 다양한 원리를 이용하여 적절하게 설계된 메타물질은 기존의 자연적인 비선형 물질에서 나타나지 않는 매우 강한 비선형성을 가질 수 있다. 또한 메타물질의 특이한 전자기적 성질 때문에 비선형 광학적 성질들도 매우 독특하다. 이미 비선형 음굴절률 메타물질에서 일어나는 2차 조화파 발생(second harmonic generation) [14-22], 광쌍안정성(optical bistability) [23-25], 광 솔리톤(optical soliton) 형성 [26], 위상 공액(phase conjugation) [27] 등의

특집 1 ■ 메타물질

비선형 메타물질

김기홍*

이용하여 해상도의 제한이 없는 superlens를 만들 수 있다는 제안을 Pendry가 한 이후, 메타물질에 대한 이론적, 실험적 연구가 전세계적으로 매우 활발히 진행되고 있다 [3, 4]. 음굴절률 메타물질의 실험적 구현은 마이크로파 영역에서 최초로 이루어졌으나 [5], 최근에는 적외선 및 가시광선 영역에서도 많은 실험적 연구가 진행되고 있다 [6-8]. 또한 카이랄(chiral) 메타물질 [9, 10], 쌍곡선(hyperbolic) 메타물질처럼 [11, 12] 전자기파와의 상호작용이 전자기파의 주파수 뿐 아니라 편광 및 전파 방향에도 의존하는 더 복잡한

현상들에 관한 이론적, 실험적 연구가 이루어져 왔으며 보통의 유전체 매질과는 현저히 다른 특성을 나타냄이 밝혀지고 있다.

이 글에서는 비선형 메타물질에 관한 최신 연구 동향을 간략하게 살펴보고자 한다. 현재 연구되고 있는 비선형 메타물질의 유형, 비선형 메타물질에서 일어나는 대표적인 현상들의 특성 및 연구 결과, 미래의 연구 방향 등에 대해 살펴보고, 불균일한 비선형 메타물질에서 일어날 수 있는 몇 가지 흥미있는 물리 현상들에 대해 기술하고자 한다.

* 아주대학교 물리학과

2. 비선형 메타물질의 연구 동향

2.1 비선형 메타물질의 유형

메타물질 내부에서는 파장보다 훨씬 더 미세한 공간적 구조를 갖는 금속 재질의 구성 요소들로 인하여 좁은 영역들에서의 국소(local) 전자기장이 매우 증대된다. 그러므로 메타물질의 나노구조를 비선형 광학적 물질과 결합하면 크게 증대된 광학적 비선형성을 구현할 수 있다. 메타물질은 같은 주파수대에서 유전율과 투자율이 둘 다 주파수에 강하게 의존하는 이상 분산(anomalous dispersion)을 나타내는데, 이 현상을 잘 이용하고 비선형 물질의 종류와 메타물질의 구조를 적절히 선택하면 크기가 작고, 구동 문턱(threshold)이 낮으며, 광대역에서 작동하고, 가변성(tunability)이 좋은 비선형 광소자를 구현할 수 있다 [28]. 이런 가능성 때문에 비선형 메타물질은 메타물질 분야에서 점점 더 중요한 위치를 갖게 될 것으로 예상된다.

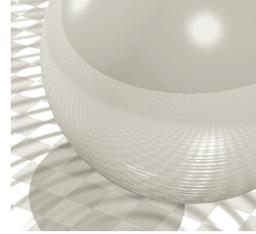
자연적인 물질을 이용한 전통적인 비선형 광학에서도 광학적 비선형성을 나타내는 다양한 메커니즘이 존재한다. 유사하게 메타물질의 경우에도 비선형성을 나타내는 여러 유형이 제시되었다. 비선형 메타물질에 관한 최초의 본격적인 이론적 연구는 Zharov, Shadrivov, Kivshar에 의해 시작되었다고 볼 수 있다 [23]. 이들은 금속선(metallic wire)과 단일 스플릿 링 공진기(split-ring resonator, SRR)의 주기적 배열을 통해 설계된 음굴절률 메타물질을 고려하였다. 금속선과 SRR을 둘러싼 매질이 Kerr 비선형성을 갖는 유전체일 경우 매우 흥미 있는 현상이 일어날 수 있다. SRR에 작용하는 자기장의 강도가 증가하면 SRR에 흐르는 전류가 커지게 되고 이것은 SRR의 좁은 간극(gap) 영역에 작용하는 전기장의 변화를 유발한다. 유전체의 Kerr 비선형성 때문에 이 변화는 간극 영역의 전기용량 변화를 일으키며 이것은 다시 전류의 변화를 가져온다. 결과적으로 전체 매질은 자기장의 강도에 비선형적으로 의존하는 자화(magnetization)를 갖는 매질, 즉 투자율이 자기장의 강도에 의존하는 비선형 자기적 매질이 됨을 알 수 있다. Zharov 등은 음굴절률 메타물질의 경우 유도된 자기적 비선형성이 Kerr 매질에 의한 전기적 비선형성보다 훨씬 커짐을

보였다. 일반적으로 투자율의 자기장 강도에 대한 의존성은 상당히 복잡한 함수 형태를 띤다. 입사하는 전자기파의 강도가 바뀔에 따라 메타물질의 굴절률은 음에서 양으로, 다시 양에서 음으로 바뀌는 전이 현상이 일어난다고 예측되었다. 또한 상당히 복잡한 형태의 광학적 이력(optical hysteresis) 현상이 일어남이 예측되었다.

이 연구 이후에 많은 연구자들에 의한 다양한 이론적, 실험적 후속 연구가 활발하게 이루어져 왔다. 마이크로파 영역에서 가장 많이 시도된 방법은 SRR의 간극에 비선형 IV 특성을 갖는 소자인 varactor 다이오드를 삽입하여 비선형성을 도입하는 방법이다 [29]. 다이오드가 삽입된 SRR은 위에서 기술한 것과 유사한 메커니즘에 의해 자기적 비선형성을 띠게 된다. 이 방법을 이용해 제작된 비선형 메타물질에서 마이크로파의 투과율 및 SRR의 공명 주파수가 입사파의 강도에 의존하는 현상과 2차 조화파 발생 현상에 관한 실험이 다수 보고되었다 [18-20, 30, 31].

varactor 다이오드를 이용하는 방법은 마이크로파 영역에 한정되어 있다. 적외선 및 가시광선 영역에서는 SRR 기반의 메타물질 주변에 강한 비선형성을 갖는 유전체를 접촉시켜 비선형성을 증대시키는 방법이 사용된다. 이를 위해 SRR 배열을 GaAs 기판 위에 제작하거나 [16], 탄소나노튜브 [32] 또는 그래핀을 [33] 메타물질과 결합시키는 방법 등이 시도되었다. 또한 주기적으로 구멍이 뚫어져 있는 두 금속 박막 사이에 부도체 박막이 끼워져 있는 형태의 fishnet 메타물질에 nematic 액정을 채워 넣은 구조에 대해서도 연구가 이루어졌다 [34]. nematic 액정의 굴절률은 외부 전기장에 의해 크게 변화하므로 매우 강한 비선형성을 갖는 메타물질이 얻어진다.

마이크로파 영역에서 제시된 또 다른 아이디어는 메타물질의 전자기적 상호작용을 역학적 자유도에 결합시키는 것이다. Lapine 등에 의해 이론적으로 제안된 자기탄성(magnetoelastic) 메타물질은 두 층의 SRR 배열을 탄성 매질 내에 삽입한 구조로 되어 있다. 전자기파가 입사하여 SRR에 전류가 유도되면 두 층의 SRR들 사이에 자기력이 생겨 두 층 사이의 거리가 줄어들게 된다. 거리가 변화함에 따라 자기력의 크기도 변화하므로 입사파의 강도에 의존하는 자기적



비선형성이 나타난다 [35]. 유사한 현상이 신축성 있는(flexible) 나선형 공진기(spiral resonator)의 주기적인 배열을 통해 제작된 메타물질에서도 일어난다 [36]. 이 경우는 공진기의 나선형 구조 때문에 원편광된 전자기파의 편광 방향에 의존하는 특성을 갖는 비선형 카이랄(chiral) 메타물질이 된다. 역학적 자유도를 도입하는 또 다른 방법에는 MEMS 구동기(actuator)를 이용하여 금속 구조 사이의 간격을 변화시킴으로써 비선형성을 도입하는 방법이 있다 [37]. 이외에도 비선형 메타물질을 구현하는 몇 가지 다른 방법들이 존재하며, 새로운 물질, 구조, 아이디어를 이용하여 더 강한 비선형성을 갖는 메타물질을 제작하려고 하는 시도가 활발하게 이루어지고 있다.

2. 2 메타물질에서의 위상정합

두 가지 이상의 다른 주파수를 갖는 파동들이 비선형 매질과 상호작용하여 일어나는 파동 혼합(wave mixing) 현상에는 조화파 발생, 주파수 변환, 광매개변수 증폭(optical parametric amplification, OPA) 등 여러 가지가 있다. 이 현상들이 효과적으로 일어나려면 2차 또는 3차 비선형 광학적 계수가 큰 값을 가져야 하고, 동시에 위상정합(phase matching)이 정확하게 이루어져야 한다. 메타물질에서 일어날 수 있는 위상정합의 종류는 대략 다섯 가지를 들 수 있다 [38]. 이 중 메타물질의 이상 분산을 이용한 이상 분산 위상정합, 비등방성 메타물질에서 전자기파의 편광 방향에 따른 복굴절(birefringence) 현상을 이용한 복굴절 위상정합, 주기적인 구조를 갖는 매질에서 전자기파의 umklapp 산란을 이용한 준위상정합(quasi-phase matching)은 기존의 비선형 광학적 물질에서와 유사한 원리를 따른다. 한편 음굴절률 메타물질과 굴절률이 거의 0인 메타물질에서는 독특한 형태의 위상정합 현상이 일어날 수 있다.

굴절률이 음인 매질의 가장 중요한 특성 중의 하나는 전자기파의 위상속도(또는 파수 벡터)와 군속도(또는 Poynting 벡터)의 방향이 정반대라는 사실이다. 음굴절률 메타물질에서는 유전율과 투자율이 둘 다 주파수에 강하게 의존하므로 특정 주파수에서

굴절률이 음이더라도 다른 주파수에서는 양의 값을 가질 수 있다. 예를 들어 2차 조화파 발생 시에 기본 주파수(fundamental frequency)에서 굴절률이 음이고 2차 조화 주파수에서 굴절률이 양인 경우 위상정합이 이루어지기 위해서는 두 파동의 Poynting 벡터 방향이 정반대여야만 한다. 이 현상을 후방(backward) 위상정합이라 부른다 [22, 39]. 균일한 음굴절률 매질에서의 에너지 흐름 및 변환에 관한 기본적인 고려를 통해 후방 위상정합이 이루어질 경우 입사하는 기본파의 에너지가 대부분 2차 조화파로 바뀌어 반사되어 나오는 비선형 거울(nonlinear mirror)이 가능함을 보일 수 있다. 이 경우 조화파 변환 효율은 기존의 비선형 물질에 비해 훨씬 더 증대될 수 있다.

유전율 또는 투자율이 거의 0인 메타물질에서는 굴절률 또한 거의 0이 된다. 이 경우에는 파동방정식에 특이성(singularity)이 나타나고 그로 인한 여러 가지 독특한 현상들이 일어난다 [40–43]. 굴절률이 거의 0인 메타물질에 주기적인 구조를 도입하여 2차 조화파 발생을 위한 준위상정합을 시도하면 입사파의 방향과 같은 방향 및 반대 방향에 대해 이중의 준위상정합이 가능해진다 [38]. 즉 입사한 기본파에 대해 2차 조화파는 전방과 후방으로 발생한다. 유사한 원리에 의해 이 물질에서는 다른 형태의 두 종류 이상의 비선형 광학적 과정들이 동시에 발생하는 것이 가능하다.

2. 3 메타물질에서의 비선형 광학적 현상들

Klein 등은 유리 기판위에 제작된 2차원 SRR 배열로 이루어진 메타물질에 대해 $1.5 \mu\text{m}$ 파장의 입사파에 대한 2차 및 3차 조화파 발생 실험을 수행하였다 [14, 15]. 실험 결과의 분석을 통해 이 연구자들은 조화파 발생의 주요 메커니즘이 기존의 경우와는 달리 금속 전자들이 전자기파의 자기장에 반응하여 일어나는 자기 쌍극자 공명이라고 주장하였다. 이 견해에 대해서는 최근에 반론이 제기되었다 [44]. 같은 연구 그룹에서는 유사한 실험을 GaAs 기판위에 제작된 SRR 배열에 대해 수행하여 2차 조화파 발생 효율이 유리 기판의 경우보다 25 배 가량 증대됨을 보였다 [16]. 이외에도 $1.5 \mu\text{m}$ 파장대에서 fishnet 메타물질에서의 조화파 발생 실험이 보고되었고 [17], varactor 다이오드를

비선형 메타물질

삽입한 메타물질에서 마이크로파에 대한 조화파 발생 및 비선형 거울 구현 실험이 여러 그룹에 의해 수행되었다 [18–20].

음굴절률 메타물질은 전기적, 자기적 공명 현상에 바탕을 두고 있으므로 강한 분산을 나타냄과 동시에 유전율과 투자율의 허수부가 필연적으로 무시할 수 없을 정도의 값을 갖게 된다. 이 때문에 메타물질 내에서 전자기파의 에너지 손실이 일어나게 되는데 이것은 음굴절률 메타물질의 응용성을 제한하는 가장 큰 요인들 중의 하나이다. 이를 극복하기 위해 3파 혼합 또는 4파 혼합을 통한 OPA를 이용하여 손실을 상쇄시키고자 하는 아이디어가 제안되었다 [45–47]. 증폭시키고자 하는 파동의 주파수는 음굴절률 대역에 속하고 나머지 파동들은 양굴절률 대역에 속하게 하며 후방 위상정합이 이루어진다. 이 아이디어는 메타물질의 실용화를 위해 중요한 역할을 할 가능성이 있다.

쌍안정성 또는 다안정성(multistability) 현상은 주어진 매개변수 값들에 대해 파동방정식의 해가 두 개 또는 여러 개 존재하는 경우에 일어나며 비선형성이 충분히 큰 경우에만 가능하다. 금속선과 SRR의 주기적인 배열을 바탕으로 한 음굴절률 메타물질에서 일어나는 광쌍안정성 현상은 Zharov 등에 의해 이론적으로 연구되었다 [23]. 입사파의 강도가 어떤 범위 이내에 있을 때에만 쌍안정성 현상이 일어나며 다소 복잡한 광학적 이력 현상이 수반된다. 단일 SRR에 대해서는 실험적으로 쌍안정성 및 이력 현상이 관찰되었지만 [24] 많은 SRR들로 이루어진 메타물질에 관한 실험 결과는 아직 보고된 적이 없다.

비선형 메타물질에서는 기존의 비선형 광학적 물질들에서와는 다른 형태의 광 솔리톤이 형성, 전파될 수 있다 [26]. 이에 관해서는 아직 이론적인 연구만 이루어졌다. 이외에도 여러 가지 다른 비선형 광학적 현상들에 대한 연구가 수행되었다. 실험적으로 가장 자세히 연구된 현상은 메타물질에 입사하는 전자기파의 투과율이 입사파의 강도 [18, 30, 31, 34, 36], 외부 전기장 [19, 34], 온도 [48] 등에 강하게 의존하는 현상이다. 가변 메타물질은 메타물질 기반의 소자들을 개발하는 데 핵심적인 역할을 할 것으로 예상된다.

2. 4 비선형 메타물질 연구의 전망

메타물질 연구는 아직 초기 단계에 있다고 볼 수 있으며 새로운 물질, 구조, 아이디어에 바탕을 둔 메타물질이 계속 구현되고 있다. 지금까지 연구된 메타물질은 대부분 2차원 구조를 갖고 있으며, 비등방적이고, 마이크로파 영역에서 기능한다. 따라서 적외선 및 가시광선 영역에서 기능하는 등방성 3차원 메타물질을 구현하는 것은 중요한 연구 방향이다 [3]. 메타물질 연구의 핵심이라고 볼 수 있는 음굴절률 메타물질에서는 굴절률이 음의 값을 갖는 주파수 대역을 크게 늘리고 손실을 대폭 줄이는 것이 중요하다. 비선형 메타물질을 이용하여 이 목적을 달성하고자 하는 시도가 활발히 이루어지고 있다 [28].

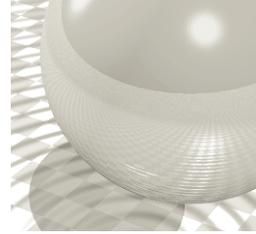
메타물질의 또 다른 응용으로 최근에 각광을 받고 있는 변환 광학(transformation optics) 분야가 있다 [49, 50]. 정교하게 설계된 불균일(inhomogeneous) 메타물질을 이용하여 전자기파의 전파 특성을 원하는 형태로 변환시키고자 하는 시도인데 이를 위해서는 많은 수의 메타원자들로 이루어진 불균일한 메타물질을 제작할 수 있는 기술이 필요하다. 비선형 매질 또는 능동(active) 매질을 변환 매질과 결합하여 새로운 가능성을 찾는 것은 흥미 있는 연구 문제이다. 불균일 구조를 적절히 설계하여 국소 전기장 또는 자기장을 매우 증대시킴으로써 거대 비선형성을 구현하는 것이 가능한데 이와 관련된 몇 가지 개념들에 대해서는 다음 절에서 설명할 것이다.

최근에 쌍곡선 메타물질과 같은 특별한 메타물질을 이용하여 빈 공간의 복사 스펙트럼을 원하는 형태로 구현함으로써 응용 가능성과 함께 새로운 양자 전자기적 현상을 찾고자 하는 노력이 시도되고 있다 [12]. 비선형 메타물질을 이용하면 빈 공간의 전자기적 특성이 가변성을 갖게 되고 양자 전자기적 특성은 더욱 강해질 것으로 예상되므로 매우 흥미 있는 연구 토픽이 될 수 있다.

3. 불균일한 비선형 메타물질

3. 1 비선형성에 의해 유도된 공간적 불균일성

메타물질에서는 전기적 비선형성과 자기적 비선형성이



서로를 유도할 수 있으므로 비선형 음굴절률 메타물질을 제대로 기술하려면 유전율과 투자율이 각각 전기장, 자기장의 강도에 의존하는 이론적 모델을 고려해야 한다. Kerr 형태의 등방성 비선형성을 갖는 가장 간단한 모델은 아래와 같다.

$$\epsilon = \epsilon_0 + \alpha |E|^2, \mu = \mu_0 + \beta |H|^2$$

비선형 메타물질에 관한 많은 이론적 연구들의 문제점은 전체 매질을 균일한 매질로 보는 유효 매질 근사(effective medium approximation)를 사용했다는 데 있다 [23]. 비선형 메타물질에서는 유전율 및 투자율이 국소 전기장 및 자기장의 강도에 의존한다. 여기서 국소 전기장장은 미시적인 전기장장이 아니라 적절한 수의 메타원자들에 대해 평균된(coarse-grained) 전기장장을 의미한다. 메타물질 내부에서 국소 전기장장의 크기는 위치에 강하게 의존하므로 유전율과 투자율 역시 위치의 함수로서 간주해야 한다. 따라서 모든 비선형 메타물질의 이론적 분석은 유효 매질 근사를 사용하지 않고 불균일한 매질에 대한 전기장과 파동방정식을 정확하게 풀어서 이루어져야 한다 [51]. 그림 1은 유한한 크기의 균일한 비선형 음굴절률 메타물질에 평면 전기장이 입사할 때의 투과율을 비선형성의 강도를 나타내는 변수의 함수로서 나타낸 것이다 [51]. 비선형성의 강도는 비선형 계수와 입사파의 강도의 곱에 의해 주어진다. 비선형성의 크기가 어떤 범위 내에 있을 때에만 광다안정성이 나타남을 알 수 있다.

그림 2에서는 그림 1의 A 점에 해당하는 상황에 대해 전기장의 강도, 유효 유전율 및 투자율, 유효 굴절률을

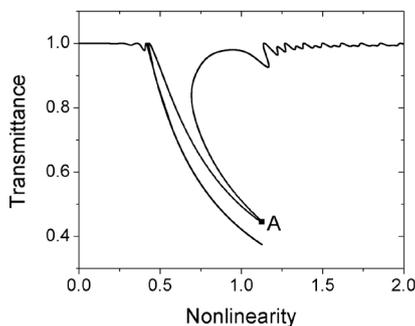


그림 1. 균일한 비선형 음굴절률 매질에서 평면파의 투과율 [51]

위치의 함수로서 나타냈다. 입사한 전자기파로 인해 메타물질 내에 강한 공간적 불균일성이 유도됨을 알 수 있다. 위치에 따라 유효 굴절률이 음인 영역과 양인 영역이 나타나며, 유효 유전율, 유효 투자율 중 하나만 음이어서 금속처럼 행동하는 영역도 나타난다. 이와 같은 유도된 불균일성으로 인해 여러 가지 새로운 물리 현상이 일어날 수 있을 것으로 예상된다.

3. 2 국소적으로 유전율 또는 투자율이 0인 매질에서 일어나는 모드변환 현상

음굴절률 매질을 이용해 만드는 각종 구조들은 대개 음굴절률 매질과 양굴절률 매질 사이의 경계면을 다수 포함한다. 대부분의 이론적 연구에서는 이 경계면을 가로지르면서 굴절률이 양에서 음으로 불연속적으로 바뀐다고 가정하고 있다. 그러나 많은 실제 구조들에서는 굴절률의 변화가 연속적으로 일어날 수 있으므로, 경계면 근처에서 굴절률의 불균일성과 굴절률의 실수부가 0인 위치가 나타날 가능성을 고려해 주어야 한다. 더 일반적인 불균일한 메타물질에서는 유전율 또는 투자율의 실수부가 국소적으로 0인 영역이 나타날 수 있다.

굴절률이 0인 지점, 즉 ϵ 또는 μ 가 0인 지점에서는 빈 공간에서 전파하는 전자기파는 항상 횡파라는 잘 알려진 결과를 유도할 때 사용된 전체 조건이 만족되지 않는다.

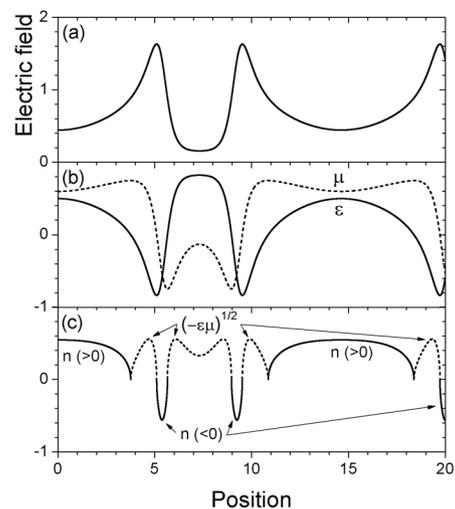


그림 2. 그림 1의 A 점에 해당하는 상황에서 전기장, 유효 유전율 및 투자율, 유효 굴절률의 공간 분포 [51]

비선형 메타물질

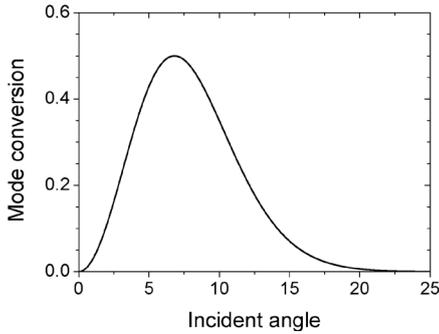


그림 3. 음굴절률 매질과 양굴절률 매질 사이의 전이층에서의 모드변환 계수 [53]

그러므로 이 지점에서는 플라즈마파와 같은 종파 형태의 전자기파가 국소적으로 여기될 수 있다. 외부에서 입사한 전자기파의 에너지는 굴절률이 0인 지점에서 플라즈마파로 연속적으로 변환되므로 마치 전자기파의 에너지가 매질에 흡수된 것처럼 관찰된다. 이 현상을 모드변환(mode conversion)이라고 부른다. ϵ 이 0인 지점을 포함하는 불균일한 플라즈마에서 일어나는 모드변환 현상은 플라즈마 물리학에서 잘 알려진 매우 중요한 현상으로서 지구 자기권에서 일어나는 각종 전자기파 전파 현상이나 토카막 플라즈마의 가열에 중요한 역할을 한다 [52].

모드변환이 일어나는 지점에서는 국소 전자기장의 크기가 매우 증대되는 현상이 일반적으로 일어난다. 메타물질의 경우에도 이 현상이 일어나며 특히 유전율과 투자율의 실수부가 동시에 0이 되는 지점에서는 전자기장이 엄청나게 증대되는 현상이 일어난다 [53]. 그러므로 비선형 메타물질에서 모드변환이 일어날 경우 거대 비선형성이 구현될 수 있을 것으로 예상된다. 그림 3은 양굴절률 매질과 음굴절률 매질 사이에 굴절률이 선형으로 변화하는 전이층(transition layer)이 있을 경우, 입사하는 전자기파가 일으키는 모드변환을 특정 주파수에서 입사각의 함수로서 나타낸 것이다 [53]. 모드변환 계수는 입사각의 에너지 중 플라즈마파로 변환된 비율을 나타낸다.

3. 3 메타물질에서의 표면파

균일한 선형 음굴절률 메타물질에서의 표면 플라즈몬(surface plasmon)에 관한 이론적 연구는 2000년 이후에 비교적 자세히 이루어져 왔다 [54, 55].

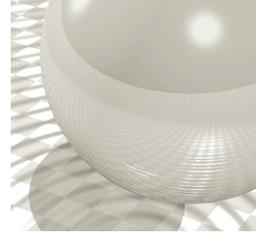
또한 카이랄 메타물질과 쌍곡선 메타물질 표면에서 여기되는 독특한 표면파에 대해서도 이론적 연구 결과가 보고된 바 있다 [56, 57]. 대부분의 연구는 균일한 선형 매질에 국한되어 있고 불균일한 메타물질이나 비선형 메타물질에서의 표면 플라즈몬에 관한 연구는 매우 드물며 제한적이다 [58, 59]. 또한 실제 메타물질에서는 유전율과 투자율의 허수부가 존재하므로 표면파를 연구할 때도 이를 포함시켜야 하는데 상당수의 이론적 연구에서는 이 효과를 무시하고 있다. 허수부를 포함시킬 경우 표면파의 여기 조건이 상당히 달라질 수 있으므로 이 가정은 수정되어야 한다.

광자결정 분야의 연구에서 알려진 또 다른 형태의 표면파로 Tamm 플라즈몬이 존재한다 [60]. 이 표면파는 표면 플라즈몬과 전혀 무관한 것으로서 주기적인 구조를 갖는 매질의 표면에 존재하는 파동이다. Tamm 플라즈몬의 주파수는 주기적인 매질의 띠허격(band gap) 내에 속하므로 이 파동은 매질 내부로 전파하지 못하고 표면에서만 전파한다. Tamm 플라즈몬이 여기될 때의 국소 전자기장은 표면 플라즈몬이 여기될 때보다 훨씬 더 증대될 수 있다. 이 결과로부터 매우 증대된 비선형성을 갖는 Tamm 플라즈몬 기반의 메타물질 소자의 가능성을 기대할 수 있다.

Dyakonov는 1988년에 비등방성 매질의 표면에 존재할 수 있는 독특한 형태의 표면파를 예측한 바 있다 [61]. 이 표면파가 구현되려면 매질의 비등방성이 충분히 커야 하는데 자연적인 매질의 경우 이 조건을 만족하기가 거의 불가능하다는 문제점이 있다. Artigas와 Torner는 최근에 주기적인 구조의 메타물질을 잘 설계하면 Dyakonov의 표면파를 구현할 수 있다는 흥미 있는 아이디어를 제시하였다 [57]. 이와 관련된 자세한 이론적, 실험적 연구는 아직 이루어지지 않았다.

3. 4 주기적, 준주기적 또는 무질서한 메타물질

주기적인 구조를 갖는 광자결정과 준주기적 구조를 갖는 광자결정에 대해서는 지난 20여년간 많은 연구가 이루어져 왔다. 비선형 메타물질과 관련하여 특히 관심 있는 것은 결함(defect) 상태와 band edge 상태에서의



전자기장 증대 현상이다. 이 현상을 주기적인 또는 준주기적인 메타물질에 잘 활용함으로써 비선형성을 증대시킬 수 있다. 광자결정 및 광자준결정을 이용한 준위상정합 개념도 메타물질에서의 조화파 발생 및 주파수 변환 현상에 활용될 수 있다 [62].

무질서한 음극절물 메타물질을 포함한 더 일반적인 메타물질에서 일어나는 Anderson 국소화 현상에 관한 연구는 현재 매우 초기 단계에 있다 [63]. 실제 메타물질에서 어느 정도의 무질서가 나타나는 것은 피할 수 없으므로 메타물질의 특성에 무질서가 미치는 영향을 밝히는 것은 매우 중요하다. 메타물질의 기본적인 특성들이 무질서로 인해 약화되는가 강화되는가를 밝히는 것이 주요 과제라고 볼 수 있다. 또한 Anderson 국소화가 일어날 때는 전기장 또는 자기장이 주변에 비해 특별히 강한 'hot spot'들이 나타나게 되는데 이 지점들에서의 전자기장 증대로 인해 2차 조화파 발생과 같은 비선형 광학적 특성이 증대될 것으로 예상된다. 메타물질은 전자기파의 전기장과 자기장에 동시에 반응하므로 전기장 및 자기장의 hot spot들에 의해 유도되는 현상들이 매우 특이할 것으로 예상된다.

4. 결론

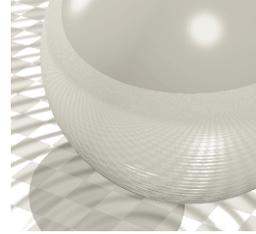
지금까지 비선형 메타물질의 연구 동향 및 발전 방향과 불균일한 비선형 메타물질에서 일어나는 현상들에 대해 간략히 살펴보았다. 레이저의 개발과 함께 시작된 비선형 광학은 많은 흥미 있는 물리 현상들과 큰 응용 가능성이 있음에도 불구하고 자연계에 존재하는 물질들의 비선형성이 작다는 사실 때문에 한계를 갖고 있다. 메타물질이 제공하는 가능성을 이용하여 비선형성이 매우 증대된 새로운 물질을 만들 수 있다면 비선형 광학의 응용성은 크게 확장될 수 있을 것이다. 자기탄성 메타물질의 예에서처럼 메타물질에 새로운 자유도를 도입하여 전자기적 상호작용과 결합하려는 시도가 유용한 결과를 낼 수 있다 [35]. 메타물질이 많은 수의 메타원자들로 이루어진 고체라는 점으로부터 예를 들어 메타 자성(meta-magnetism)과 같이 [64] 고체물리학에서 자세히 연구된 여러 개념들을 도입하는 것도 매우 흥미 있다.

참고문헌

1. J. B. Pendry, Negative refraction makes a perfect lens, *Phys. Rev. Lett.* 85, 3966 (2000).
2. V. G. Veselago, The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ , *Sov. Phys. Usp.* 10, 509 (1968).
3. C. M. Soukoulis and M. Wegener, Past achievements and future challenges in the development of three-dimensional photonic metamaterials, *Nat. Photonics* 5, 523 (2011).
4. N. I. Zheludev, The road ahead for metamaterials, *Science* 328, 582 (2010).
5. R. Shelby, D. R. Smith, and S. Schultz, Experimental verification of a negative index of refraction, *Science* 292, 77 (2001).
6. V. M. Shalaev, W. Cai, U. K. Chettiar, H.-K. Yuan, A. K. Sarychev, V. P. Drachev, and A. V. Kildishev, Negative index of refraction in optical metamaterials, *Opt. Lett.* 30, 3356 (2005).
7. G. Dolling, M. Wegener, C. M. Soukoulis, and S. Linden, Negative-index metamaterial at 780 nm wavelength, *Opt. Lett.* 32, 53 (2007).
8. J. Valentine, S. Zhang, T. Zentgraf, E. Ulin-Avila, D. A. Genov, G. Bartal, and X. Zhang, Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index, *Nature* 455, 376 (2008).
9. M. Decker, M. W. Klein, M. Wegener, and S. Linden, Circular dichroism of planar chiral magnetic metamaterials, *Opt. Lett.* 32, 856 (2007).
10. S. Zhang, Y.-S. Park, J. Li, X. Lu, W. Zhang, and X. Zhang, Negative refractive index in chiral metamaterials, *Phys. Rev. Lett.* 102, 023901 (2009).
11. J. Yao, Z. Liu, Y. Liu, Y. Wang, C. Sun, G. Bartal, A. M. Stacy, and X. Zhang, Optical negative refraction in bulk metamaterials of nanowires, *Science* 321, 930 (2008).
12. M. A. Noginov, H. Li, Y. A. Barnakov, D. Dryden, G. Nataraj, G. Zhu, C. E. Bonner, M. Mayy, Z. Jacob, and E. E. Narimanov, Controlling spontaneous emission with metamaterials, *Opt. Lett.* 35, 1863 (2010).
13. C. Denz, S. Flach, and Y. S. Kivshar (eds.), *Nonlinearities in Periodic Structures and Metamaterials* (Springer, 2010).
14. M. W. Klein, C. Enkrich, M. Wegener, and S. Linden, Second-harmonic generation from magnetic metamaterials, *Science* 313, 502 (2006).
15. M. W. Klein, M. Wegener, N. Feth, and S. Linden, Experiments on second- and third-harmonic generation from magnetic metamaterials, *Opt. Express* 15, 5238 (2007).
16. F. B. P. Niesler, N. Feth, S. Linden, J. Niegemann, J. Gieseler, K. Busch, and M. Wegener, Second-harmonic

비선형 메타물질

- generation from split-ring resonators on a GaAs substrate, *Opt. Lett.* 34, 1997 (2009).
17. E. Kim, F. Wang, W. Wu, Z. Yu, and Y. R. Shen, Nonlinear optical spectroscopy of photonic metamaterials, *Phys. Rev. B* 78, 113102 (2008).
 18. I. V. Shadrivov, A. B. Kozyrev, D. W. van der Weide, and Y. S. Kivshar, Tunable transmission and harmonic generation in nonlinear metamaterials, *Appl. Phys. Lett.* 93, 161903 (2008).
 19. Z. Wang, Y. Luo, L. Peng, J. Huangfu, T. Jiang, D. Wang, H. Chen, and L. Ran, Second-harmonic generation and spectrum modulation by an active nonlinear metamaterial, *Appl. Phys. Lett.* 94, 134102 (2009).
 20. A. Rose, D. Huang, and D. R. Smith, Controlling the second harmonic in a phase-matched negative-index metamaterial, *Phys. Rev. Lett.* 107, 063902 (2011).
 21. I. V. Shadrivov, A. A. Zharov, and Y. S. Kivshar, Second-harmonic generation in nonlinear left-handed metamaterials, *J. Opt. Soc. Am. B* 23, 529 (2006).
 22. A. K. Popov, V. V. Slabko, and V. M. Shalaev, Second harmonic generation in left-handed metamaterials, *Laser Phys. Lett.* 3, 293 (2006).
 23. A. A. Zharov, I. V. Shadrivov, and Y. S. Kivshar, Nonlinear properties of left-handed metamaterials, *Phys. Rev. Lett.* 91, 037401 (2003).
 24. B. Wang, J. Zhou, T. Koschny, and C. M. Soukoulis, Nonlinear properties of split-ring resonators, *Opt. Express* 16, 16058 (2008).
 25. P.-Y. Chen, M. Farhat, and A. Alù, Bistable and self-tunable negative-index metamaterial at optical frequencies, *Phys. Rev. Lett.* 106, 105503 (2011).
 26. N. N. Rosanov, N. V. Vysotina, A. N. Shatsev, A. S. Desyatnikov, and Y. S. Kivshar, Knotted solitons in nonlinear magnetic metamaterials, *Phys. Rev. Lett.* 108, 133902 (2012).
 27. A. R. Katko, S. Gu, J. P. Barrett, B.-I. Popa, G. Shvets, and S. A. Cummer, Phase conjugation and negative refraction using nonlinear active metamaterials, *Phys. Rev. Lett.* 105, 123905 (2010).
 28. M. Lapine, I. Shadrivov, and Y. Kivshar, Wide-band negative permeability of nonlinear metamaterials, *Sci. Rep.* 2, 412 (2012).
 29. M. Lapine, M. Gorkunov, and K. H. Ringhofer, Nonlinearity of a metamaterial arising from diode insertions into resonant conductive elements, *Phys. Rev. E* 67, 065601 (2003).
 30. I. V. Shadrivov, A. B. Kozyrev, D. W. van der Weide, and Y. S. Kivshar, Nonlinear magnetic metamaterials, *Opt. Express* 16, 20266 (2008).
 31. D. Huang, E. Poutrina, and D. R. Smith, Analysis of the power dependent tuning of a varactor-loaded metamaterial at microwave frequencies, *Appl. Phys. Lett.* 96, 104104 (2010).
 32. A. E. Nikolaenko, F. De Andelis, S. A. Boden, N. Papasimakis, P. Ashburn, E. Di Fabrizio, and N. I. Zheludev, Carbon nanotubes in a photonic metamaterial, *Phys. Rev. Lett.* 104, 153902 (2010).
 33. A. E. Nikolaenko, N. Papasimakis, E. Atmatzakis, Z. Luo, Z. X. Shen, F. De Andelis, S. A. Boden, E. Di Fabrizio, and N. I. Zheludev, Nonlinear graphene metamaterial, *Appl. Phys. Lett.* 100, 181109 (2012).
 34. A. Minovich, J. Farnell, D. N. Neshev, I. McKerracher, F. Karouta, J. Tien, D. A. Powell, I. V. Shadrivov, H. H. Tan, C. Jagadish, Y. S. Kivshar, Liquid crystal based nonlinear fishnet metamaterials, *Appl. Phys. Lett.* 100, 121113 (2012).
 35. M. Lapine, I. V. Shadrivov, D. A. Powell, and Y. S. Kivshar, Magnetoelastic metamaterials, *Nat. Mater.* 11, 30 (2012).
 36. M. Lapine, I. V. Shadrivov, D. A. Powell, and Y. S. Kivshar, Metamaterials with conformational nonlinearity, *Sci. Rep.* 1, 138 (2011).
 37. X. Yin, T. Feng, Z. Liang, and J. Li, Artificial Kerr-type medium using metamaterials, *Opt. Express* 20, 8543 (2012).
 38. A. Rose and D. R. Smith, Overcoming phase mismatch in nonlinear metamaterials, *Opt. Mater. Express* 1, 1232 (2011).
 39. V. M. Agranovich, Y. R. Shen, R. H. Baughman, and A. A. Zakhidov, Linear and nonlinear wave propagation in negative refraction metamaterials, *Phys. Rev. B* 69, 165112 (2004).
 40. M. Silveirinha and N. Engheta, Tunneling of electromagnetic energy through subwavelength channels and bends using -near-zero materials, *Phys. Rev. Lett.* 97, 157403 (2006).
 41. A. Ciattoni, C. Rizza, and E. Palange, Extreme nonlinear electrodynamics in metamaterials with very small linear dielectric permittivity, *Phys. Rev. B* 81, 043839 (2010).
 42. Y. Jin, S. Xiao, N. A. Mortensen, and S. He, Arbitrarily thin metamaterial structure for perfect absorption and giant magnification, *Opt. Express* 19, 11114 (2011).
 43. M. A. Vincenti, D. de Ceglia, A. Ciattoni, and M. Scalora, Singularity-driven second- and third-harmonic generation at -near-zero crossing points, *Phys. Rev. A* 84, 063826 (2012).
 44. C. Ciraci, E. Poutrina, M. Scalora, and D. R. Smith, Origin of second-harmonic generation enhancement in optical split-ring resonators, [arXiv:1204.5676v1](https://arxiv.org/abs/1204.5676v1)
 45. A. K. Popov and V. M. Shalaev, Compensating losses in negative-index metamaterials by optical parametric amplification, *Opt. Lett.* 31, 2169 (2006).
 46. A. K. Popov, S. A. Myslivets, T. F. George, and V. M. Shalaev, Four-wave mixing, quantum control, and compensating losses in doped negative-index photonic metamaterials, *Opt. Lett.* 32, 3044 (2007).
 47. A. B. Kozyrev, H. Kim, and D. W. van der Weide,



- Parametric amplification in left-handed transmission line media, *Appl. Phys. Lett.* 88, 264101 (2006).
48. J. Y. Ou, E. Plum, L. Jiang, and N. I. Zheludev, Reconfigurable photonic metamaterials. *Nano Lett.* 11, 2142 (2011).
49. J. B. Pendry, D. Shurig, and D. R. Smith, Controlling electromagnetic fields, *Science* 312, 1780 (2006).
50. H. Chen, C. T. Chan, and P. Sheng, Transformation optics and metamaterials, *Nat. Mater.* 9, 387 (2010).
51. K. Kim, D. K. Phung, F. Rotermund, and H. Lim, Propagation of electromagnetic waves in stratified media with nonlinearity in both dielectric and magnetic responses, *Opt. Express* 16, 1150 (2008)
52. K. Kim and D.-H. Lee, Invariant imbedding theory of mode conversion in inhomogeneous plasmas. I. Exact calculation of the mode conversion coefficient in cold, unmagnetized plasmas, *Phys. Plasmas* 12, 062101 (2005).
53. K. Kim, D.-H. Lee, and H. Lim, Resonant absorption and mode conversion in a transition layer between positive-index and negative-index media, *Opt. Express* 16, 18505 (2008).
54. R. Ruppin, Surface polaritons of a left-handed medium, *Phys. Lett. A* 277, 61 (2000).
55. A. Ishimaru, Electromagnetic waves over half-space metamaterials of arbitrary permittivity and permeability, *IEEE Trans. Antennas Propag.* 53, 915 (2005).
56. Y. Jin, J. He, and S. He, Surface polaritons and slow propagation related to chiral media supporting backward waves, *Phys. Lett. A* 351, 354 (2006).
57. D. Artigas and L. Torner, Dyakonov surface waves in photonic metamaterials, *Phys. Rev. Lett.* 94, 013901 (2005).
58. I. V. Shadrivov, A. A. Sukhorukov, Y. S. Kivshar, A. A. Zharov, A. D. Boardman, and P. Egan, Nonlinear surface waves in left-handed materials, *Phys. Rev. E* 69, 016617 (2004).
59. M. Shen, S. Pang, J. Zheng, J. Shi, and Q. Wang, Nonlinear surface polaritons in indefinite media, *J. Opt. Soc. Am. B* 29, 197 (2012).
60. A. Namdar, I. V. Shadrivov, and Y. S. Kivshar, Backward Tamm states in left-handed metamaterials, *Appl. Phys. Lett.* 89, 114104 (2006).
61. M. I. D'yakonov, New type of electromagnetic wave propagating at an interface, *Sov. Phys. JETP* 67, 714 (1988).
62. S. Kim, K. Kim, F. Rotermund, and H. Lim, Computational design of one-dimensional nonlinear photonic crystals with material dispersion for efficient second-harmonic generation, *Opt. Express* 17, 19075 (2009).
63. A. A. Asatryan, S. A. Gredeskul, L. C. Botten, M. A. Byrne, V. D. Freilikher, I. V. Shadrivov, R. C. McPhedran, and Y. S. Kivshar, Anderson localization of classical waves in weakly scattering metamaterials, *Phys. Rev. B* 81, 075124 (2010).
64. A. E. Miroshnichenko, B. Luk'Yanchuk, S. A. Maier, and Y. S. Kivshar, Optically induced interaction of magnetic moments in hybrid metamaterials, *ACS Nano* 6, 837 (2012).

약 력



김가홍

- 1985년
서울대학교 물리학과 학사
- 1991년
California Institute of Technology 물리학 박사
- 1991년 – 1994년
Ohio State University 물리학과 연구원
- 1994년 – 현재
아주대학교 물리학과 조교수, 부교수, 교수