

1. 서론

빛이나 전자기파가 물질에 입사하면, 전자기장 파동이 물질내의 전자와 상호작용하여 전자가 움직이게 된다. 이러한 원자, 분자와 빛, 전자기파의 전자기적 에너지 교환 또는 상호작용은, 물질을 이용하여 진행되는 빛을 제어할 수 있는 기본 원리가 됨으로써 전자기 장치의 설계 및 제작이 가능해진다. 이렇게 빛과 상호작용하는 물질이 각각 원자들의 집합으로 이루어져 있음에도 불구하고, 우리가 인식하는 빛의 파장(~수백 nm)이 물질 내 원자들의 크기 및 간격(~0.1 nm) 보다 훨씬 크기 때문이다. 빛의 파장이 원자간격보다 훨씬 크기 때문에 개별원자 및 분자들의 빛과의 상호작용이 평균값을 이용하여 연속

역 외의 전자기적 성질을 가지는 물질을 분자수준에서부터 화학적으로 조작하여 만드는 방법과, 빛의 파장보다 작은 인위적인 구조들을 원자들의 배열처럼 주기적으로 조합하여 만드는 방법이 있을 수 있다.

물질 내 구조들의 크기와 간격이 빛의 파장보다 훨씬 작다면 통과하는 빛은 평균적으로 근사되는 굴절률의 분포만을 느끼게 되므로, 우리가 만든 인위적인 구조들의 집합과 실제 물질간의 차이를 구별할 수 없게 된다. 이러한 인위적인 작은 구조들의 집합으로 이루어진 물질을 광 메타물질이라 하며, 메타물질의 전자기적 성질은 자연적으로 발생하는 물질이나 화학적 합성을 통한 물질의 성질보다 훨씬 넓은 영역으로 확장이 가능하다. 최근에는 이러한 광 메타물질에 대한 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있고 물질의 전자기적 성질의 응용 폭을

특집 1 ■ 메타물질

광 메타물질 응용기술

백승화, 김경식*

체와 근사한 현상으로 이해될 수 있다. 따라서 수백나노미터 이상의 파장을 가지는 가시광 영역의 빛으로는 개별 원자 구조를 분석할 수 없는 것이다.

자연계에 존재하는 대부분의 물질들이 가지는 전자기적 성질은 물리이론이 허용하는 성질의 가능한 영역보다 상당히 제한적이다. 물질의 전자기적 성질은 광학장치의 분해능 및 성능에 매우 결정적일 수 있기 때문에 이를 이용한 광학장치의 성능에도 한계가 있게 된다. 따라서 이러한 포토닉스 소재의 성능을 향상시키기 위해서 기존영

역 훨씬 넓게 확장할 수 있기 때문에 광범위한 분야에서 응용되어 발전하고 있다.

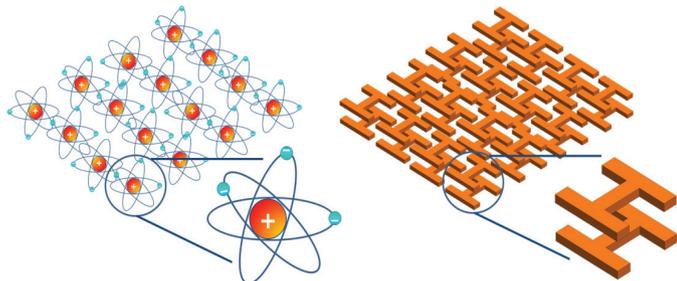


그림 1. 광 메타물질의 기본 원리에 대한 모식도

* 연세대학교 기계공학과

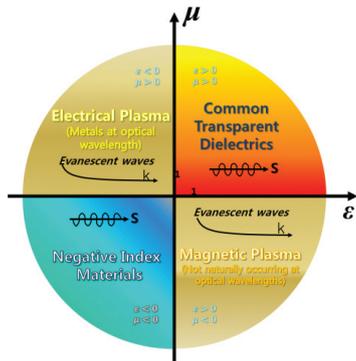
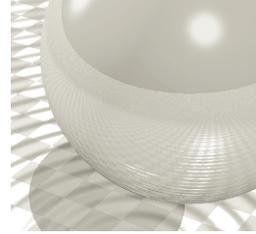


그림 2. 유전율과 투자율의 부호에 따른 물질의 분류

2. 본론

광 메타물질은 물질의 전자기적 성질을 결정하는 중요한 두 가지 물성인 유전율(Permittivity)과 투자율(Permeability)의 각각 부호에 따라 그림 2처럼 크게 4가지로 분류할 수 있다. 자연에 존재하는 대부분의 물질(반도체, 유전체, 물 등)은 둘 다 양수를 가지고 있는 1사분면 영역에 속해 있고, 금속과 같은 흡수가 강한 물질은 2사분면($\epsilon < 0, \mu > 0$)에 속해 있다. 하지만 앞에서 말한 것과 같이 요소들 구조의 크기, 모양, 간격을 디자인 함으로써 물질의 부호를 바꿀 수 있다. 여기서 각 물성의 부호에 따라 물질의 성질이 달라지는데, ϵ, μ 부호가 모두 음수이면 Double negative index material(DNG), ϵ, μ 두 물성 중 하나만 음수이면 Single negative index material(SNG)으로 나뉘어 진다.

1968년 러시아의 과학자 V. G. Veselago는 음굴절률을 가지는 물질이 존재해도 물리법칙에 위배되지 않는다고 이론적으로 제시하였다.[1] 최초 DNG의 실험적인 구현은 평면상에 주기적으로 놓여진 금속 와이어와 Split ring resonator를 겹쳐 놓은 형태에서부터 시작되었다.[2] 이후 이를 이용한 다양한 구조와 다양한 파장에서 발현되는 DNG가 연구되었다. [3,4] 이와 같이 Single Negative Materials(SNG)에 대한 연구[5,6]도 활발히 진행되었다. SNG는 두 가지 종류가 있는데 유전율이 음수이거나 투자율이 음수인 경우이다. 두 경우 모두 비슷한 성질을 가지고 있는데, 유전율이 음수인 경우는 자외선 영역에서 특별한 가공 없

이 특정 금속 박막에서 얻을 수 있지만 투자율이 음수인 경우는 주기적인 금속 소자를 통해 자기적인 공명을 만들어 주어야 한다. 따라서 제작이 쉬운 유전율이 음수인 경우의 연구가 많이 진행 되었다. 최근에 들어서는 자연 상태에서 존재하지 않는 인위적인 광 특성을 가지는 연구가 광범위하게 진행되고 있고, 다양한 응용 기술들을 연구하고 있다.

2.1 메타물질기술의 응용 ; Superlens

광학 이미징 기술은 정밀도가 높은 가공의 생산성 및 처리기술에 있어서 필수적인 기술이지만 회절한계로 인해서 분해능이 반파장보다 짧아질 수 없기 때문에 날로 가공기술이 정교해지는 요즘, 고 분해능 이미징 기술 개발의 중요성이 증가되었으며, 이러한 회절한계를 극복하기 위한 연구가 다양하게 진행되어왔다.[7] 이러한 수퍼분해능을 가지는 음의 유전율 또는 음의 투자율을 갖는 음굴절률 메타물질이 2000년 J. B. Pendry에 의해 제안 되었으며,[8] 이러한 음굴절률 메타물질을 근접장 광 이미징 시스템에 도입하여 회절한계 이상의 고분해능의 이미지를 획득할 수 있음을 실험적으로 구현하였다.[9,10] (그림3 좌 참조) 음굴절률 물질이 회절 한계를 극복하는 기술과 차별되는 점은 특정 파장의 전자기파 대역에서 표면 플라즈몬 공명(Surface Plasmon Resonance) 또는 음향양자 공명(Phonon Resonance)을 발생시켜 전자기파의 진행거리에 따라 지수함수적으로 소멸하는 소산파(evanescent wave)를 반대로 복원함으로써 회절한계를 넘어서는 고분해능이 가능하다는 것이다. 이러한 수퍼렌즈 기술은 대면적 이미징이 가능하고, 기하학적 변형이나 가공이 필요 없는 평판형(Slab) 구조이므로 종래의 광리소그래피 및 광이미징 기술과 호환성이 좋다는

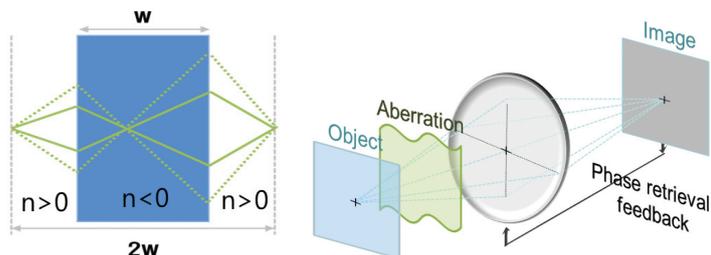


그림 3. (좌) 수퍼렌즈의 원리 [8] 및 (우) 수퍼렌즈에서의 위상보정기술 개념도[12]

광 메타물질 응용기술

장점이 있어 산업현장에 응용가능성이 매우 높다.[11] 한편, 음굴절률 물질은 이러한 장점에도 불구하고 종래에 사용되고 있는 인덱스 일치 방법 (Index matching method; 음굴절률 물질과 그 주변을 감싸고 있는 양굴절률 물질의 굴절률 또는 유전율의 실수부의 부호가 반대이고 크기는 같도록 일치시키는 방법)을 적용할 경우, 메타물질의 전자기파 흡수에 의한 이미지 퍼짐(Image Blurring)을 필연적으로 발생시킨다.[8] 이러한 이미지 퍼짐은 금속 등에서 Kramers-Kronig 물리법칙에 의해서 유전율의 허수부의 미분값에 해당하는 유전율의 실수부를 음수값이 되게 하려면, 유전율의 허수부 값이 0이 아닌 양수값으로 존재해야만 한다는 점에서 근본적으로 해결해야 하는 난제로 알려져 있었다. 이는 이미징 하고자 하는 물체면의 위상 정보를 이미지에 완벽하게 복원할 수 없게 하므로 광학 전달 함수의 위상 제어 또한 이미지 품질에 중대한 영향을 주는 요인이 된다. 하지만 이러한 매질의 전자기파 흡수에 의한 이미지 성능 저하를 최소화시키기 위해서, 원거리 장의 광학 장치에서 주로 사용되는 위상보정 방법을 능동적으로 도입하는 기술이 개발되었다.[12] 위상보정 기술을 이용하여 기존보다 더 최적화된 성능을 가진 수퍼렌즈의 설계가 가능해짐으로써 광 이미징 장치 시스템의 새로운 설계기술을 제안하였다.[13,14](그림3 우 참조) 또한 기존에 유전체와 금속의 단층으로 제작되던 수퍼렌즈를 다층박막으로 제작하면서 빛의 세기에 대한 손실은 발생하지만 이미지의 명암 차이를 향상시켰고[15], 근접장에서만 진행되었던 회절한계 극복을 원거리장까지 실현하고자 하는 연구 [16, 17] 등의 기존 광학 이미징 시스템의 기본 한계를 극복하는 기초기술로 연구가 지속되고 있다.

2.2 메타물질기술의 응용 ; Solar energy

일반적으로, 태양전지는 태양전지를 구성하는 반도체 밴드 갭(band gap) 이상의 에너지를 가지는 광자를 수확하여 전기를 발생시킨다. 태양광은 자외선에서 적외선에 이르는 넓은 영역의 스펙트럼을 가지지만, 지구의 오존층에 의해 300nm 이하의 자외선은 차단되고 반도체 밴드 갭 이상의 에너지를 가지는 광자(photon)만이 전기를 생산하는데 활용된다. 하지만, 태양전지를 구성하는 반도체와 공기(air) 사이의 큰 굴절률 차이로 인해 태양전

지 표면에서 태양광의 반사율이 높기 때문에 태양전지의 광전변환효율이 크게 저하되는 문제가 있다. 이러한 한계점을 해결하는 것은, 직렬 광기전력 전지의 효율적인 태양에너지 활용과 광학 표시 장치산업에 매우 중요하기 때문에 광전변환효율의 문제점을 해결하기 위하여 지금도 많은 연구가 광범위하게 진행되고 있다. 따라서 많은 연구 그룹에서 나노다공성 막, 나노 팁, 나노 기둥, 나노 와이어 구조 등을 이용한 패턴을 제작하여 광대역 반사 방지표면에 대한 실증적 연구를 지속해 왔다.[18-21]

지금까지 알려진 대표적인 반사방지표면(ARS; Anti Reflection Surface)을 만들기 위한 방법으로는 크게 두 가지 기술로 나눌 수 있다. 그 하나는 4분의 1 (1/4) 파장의 반사방지막을 표면에 코팅하는 것이고, 다른 하나는 생체모방 모스아이형상(biomimetic moth's eye structure)의 배열 구조를 표면에 제작하는 것이다.

1/4 파장 반사방지막에 의한 태양광 반사저감 기술은 서로 다른 두 매질 사이에 1/4 파장 두께에 해당하는 중간층을 삽입하여 이중 계면을 구성함으로써, 이들 이중 계면으로부터 반사된 태양광이 상쇄간섭(destructive interference)을 일으켜 특정 파장에서의 태양광 반사를 효과적으로 저감시키는 기술이다. 그러나 1/4파장 반사방지막을 적용한 반사 저감 기술은 제조 공정적인 측면에서 높은 생산성과 낮은 비용을 갖는 장점이 있지만, 특정한 파장과 입사각에서만 태양광의 반사율을 낮출 수 있기 때문에 광대역에 걸친 태양광 반사 저감 효과를 얻을 수 없다는 단점이 있다. 반면, 나노 원뿔(nano cone) 및 피라미드 배열 구조로 대표되는 생체모방(biomimetic) 모스아이(moth-eye) 구조는 태양광이 입사되는 주위 매질(air)로부터 태양전지의 반도체 기판까지 순차적으로 증가하는 경사 굴절률(graded index) 층을 제공함으로써 광대역에서 프레넬(Fresnel) 반사가 적게 일어나도록 한다.

경사 굴절률 층 기술은, 서로 다른 굴절률 계면에 파장 길이 이하 크기의 패턴구조를 불규칙적 또는 규칙적으로 배열함으로써 급작스러운 굴절률의 차이를 보이는 계면을 유효 매질 이론에 의거해 빛이 진행하는 방향에 따라 굴절률이 점진적으로 증가하도록 하는 원리에 의해 유도된다. 빛은 굴절률 계면에 해당하는 파장보다 작은 크기의 서로 다른 요소들이 복합적으로 배열되어 있을 때, 한 개 층의 유효한 굴절률을 갖는 매질로 인식한다. 즉,

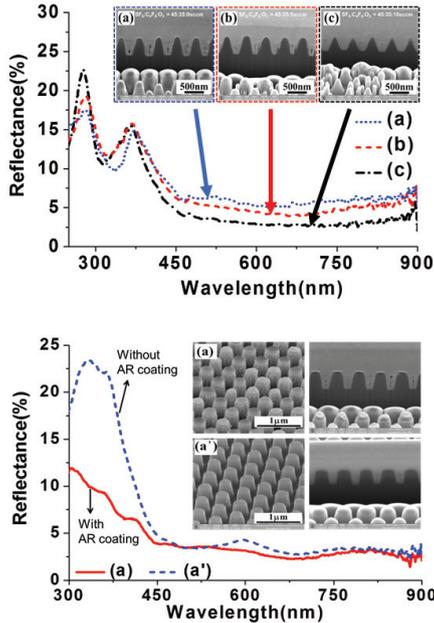
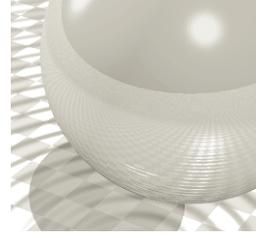


그림 4. 모스아이 구조의 반사 효율(좌)과 1/4 반사방지막과 모스아이의 융합된 소자의 효율(우) [22]

목표로 하는 파장에 대하여 인위적으로 각 요소의 굴절률과 패턴의 형상을 제작한다면, 두 계면의 유효 굴절률 (effective refractive index)을 연속적인 형태로 변형시켜 생체모방 모스아이구조의 배열주기보다 긴 파장에서 빛의 반사를 효과적으로 감소시켜 광대역의 스펙트럼과 입사각에서 태양광의 반사율을 낮출 수 있는 효과를 얻을 수 있다.

최근에는 이러한 모스 아이 구조의 유효 굴절률 반사 방지막과 1/4 두께의 반사방지막 기술을 융합한 나노섬-나방눈 구조의 형태나 나노섬-나노기둥 구조를 사용하여 기존의 각각의 반사방지막보다 훨씬 향상된 광대역성능을 가지는 태양광 소자를 개발하였다.[22, 23]

3. 결론

광 메타물질의 기본적인 이론과 몇 가지 응용 가능성에 대해서 살펴 보았다. 물질의 광 특성은 굴절률에 따라 달라지고 유전율과 투자율의 부호 및 크기에 따라 각각 다른 현상이 발생할 수 있으므로, 각각의 광 특성에 맞는 응용기술에 주목하면 광 메타물질 분야가 깊고 넓게 적용될 수 있음을 알 수 있었다. 본문에서와 같이

초기 음굴절률 물질에 대한 연구에서 시작된 광 메타물질은 자연계의 물질들이 가지지 못하는 광 특성을 설계 제작할 수 있기 때문에 다양한 광학기기의 효율을 향상시킬 수 있는 기초 기술로서의 발전 가능성 때문에 양굴절률 광 메타물질을 만들어내는 연구로까지 확장되고 있다.

참고문헌

- [1] V. G. Veselago "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ " Sov. Phys. Usp. 10, 506 (1968)
- [2] D. R. Smith, Willie J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser and S. Schultz "Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity" Phys. Rev. Lett. 84, 18 (2000)
- [3] Peter Marko and C. M. Soukoulis "Transmission properties and effectiveelectromagnetic parameters of doublenegative metamaterials" Opt. Express. 11, 7 (2003)
- [4] Richard W. Ziolkowski "Design, Fabrication, and Testing of Double Negative Metamaterials" IEEE Transactions on antennas and propagation. 51, 7 (2003)
- [5] Li-Gang Wang, Hong Chenand Shi-Yao Zhu "Omnidirectional gap and defect mode of one-dimensional photonic crystalswith single-negative materials" Phy. Rev. B. 70, 245102 (2004)
- [6] L. Gao, C. J. Tang and S. M. Wang "Photonic band gap from a stack of single-negative materials" J. Magnetism and Magnetic Materials. 301, 371-377 (2006)
- [7] Eric Betzig and Jay K. Trautman "Near-Field Optics: Microscopy, Spectroscopy, and SurfaceModification Beyond the Diffraction Limit" Science. 257 (1992)
- [8] Pendry, J. B. "Negative Refraction Makes a Perfect Lens." Phy. Rev. Lett. 85, 18 (2000)
- [9] Fang, N., H. Lee, C. Sun, and X. Zhang. "Sub-Diffraction-Limited Optical Imaging with a Silver Superlens." Science 308, 5721 (2005):
- [10] Blaikie, R.J., and D.O.S. Melville. "Imaging through Planar Silver Lenses in the Optical near Field." Journal of Optics A: Pure and Applied Optics 7, S176 (2005)
- [11] Blaikie, R. J., D. O. S. Melville, and M. M. Alkasi. "Super-Resolution near-Field Lithography Using Planar Silver Lenses: A Review of Recent Developments." Microelectronic Engineering 83, 4-9 (2006)
- [12] Lee, K., Y. Jung, G. Kang, H. Park, and K. Kim. "Active Phase Control of a Ag near-Field Superlens Via the Index Mismatch Approach." Appl.Phys. Lett. 94, 10 (2009)
- [13] Lee, K., Y. Jung, and K. Kim. "Near-Field Phase Correction

광 메타물질 응용기술

for Superresolution Enhancement.” *Phy. Rev. B*. 80, 3 (2009)

[14] Lee, K., Y. Jung, W. J. Padilla, and K. Kim. “Elimination of Phase Singularity to Achieve Superresolution in LossyMetamaterials.” *Opt. Express*. 18, 12 (2010)

[15] Melville, D. O. S., and R. J. Blaikie. “Analysis and Optimization of Multilayer Silver Superlenses for near-Field Optical Lithography.” *Phy. B-Condensed Matt*. 394, no. 2 (2007)

[16] Liu, Z. W., S. Durant, H. Lee, Y. Pikus, N. Fang, Y. Xiong, C. Sun, and X. Zhang. “Far-Field Optical Superlens.” *Nano. Lett.* 7, 2 (2007)

[17] Jacob, Z., L. V. Alekseyev, and E. Narimanov. “Optical Hyperlens: Far-Field Imaging Beyond the Diffraction Limit.” *Optics Express* 14, 18 (2006)

[18] S.Walheim, E. Schaffer, J. Mlynek and U.Steiner, “Nanophase-Separated Polymer Films as High-Performance Antireflection Coatings” *Science*. 283, 520-522 (1999)

[19] Y. F. Huang, S. Chattopadhyay, Y. J. Jen, C. Y. Peng, T. A. Liu, Y. K. Hsu, C. L. Pan, H. C. Lo, C. H. Hsu, Y. H. Chang, C. S. Lee, K. H. Chen, L. C. Chen, “Improved broadband and quasi-omnidirectional anti-reflection properties with biomimetic silicon nanostructures.” *Nature Nanotech.* 2, 770 (2007).

[20] T. Lohmuller, M. Helgert, M. Sundermann, R. Brunner, J. P. Spatz , “Biomimetic Interfaces for High-Performance Optics in the Deep-UV Light Range.” *Nano. Lett.* 8, 1429-1433 (2008).

[21] Päivänranta B, Sahoo PK, Tocce E, Auzelyte V, Ekinci Y, SolakHH, Liu CC, Stuen KO, Nealey PF and David C. “Nanofabrication of broad-band antireflective surfaces using self-assembly of block copolymers” *ACS Nano*. 5, 1860 (2011)

[22] Haesung Park, Dongheok Shin, Gumin Kang, Seunghwa Baek, Kyoungsik Kim and Willie J. Padilla “Broadband Optical Antireflection Enhancement by Integrating Antireflective Nanoislands with Silicon Nanoconical-Frustum Arrays” *Adv. Mater.* 23, 5796 (2011)

[23] P. Spinelli, M. A. Berschuuren and A. Polman “Broadband omnidirectional antireflection coating base on subwavelength surface Mie resonators” *Nature Comm.* 3, 692 (2012)

약 력

백 승 화



2010년 연세대학교 기계공학과를 졸업하고 2012년 석사 이후 현재 연세대학교 기계공학과에서 박사과정을 수행하고 있다.

약 력

김 경 식



김경식 교수는 1992년 서울대 물리학과를 졸업하고 1994년 서울대 물리학과에서 입자물리이론으로 석사를 마쳤다. 공군사관학교에서 물리학 교관으로 군복무를 마친 후, 2004년 미국 앤아버 소재 미시간 대학교에서 반도체 양자점의 펄스 레이저 분광분야를 전공하여 응용물리학 박사학위를 취득하였다. 2004-2005년 동안, 미국 콜로라도 볼더 소재 미국립표준기술연구소 (NIST)에서 펄스 레이저 광주파수빗 분야를 연구하였고, 2006년부터 연세대학교 기계공학과 교수로 재직 중이다.