

능동 광메타 디바이스 기술 동향

Active Photonic Metadevice Technology

최신 반도체, 하드웨어 기술
동향 특집

- I. 서론
- II. 기술 개요
- III. 기술 동향
- IV. 결론

황치선 (C.-S. Hwang, hwang-cs@etri.re.kr)	실감디스플레이연구그룹 책임연구원/그룹장
홍성훈 (S.H. Hong, shong@etri.re.kr)	ICT소재연구그룹 선임연구원/PL
황치영 (C.-Y. Hwang, cyhwang@etri.re.kr)	실감디스플레이연구그룹 연구원
조성목 (S.-M. Cho, smcho@etri.re.kr)	실감디스플레이연구그룹 책임연구원
김용해 (Y.H. Kim, yhakim@etri.re.kr)	실감디스플레이연구그룹 책임연구원
서동우 (D. Suh, dwsuh@etri.re.kr)	ICT소재연구그룹 책임연구원/PL
심재식 (J.S. Sim, jssim@etri.re.kr)	광융합부품연구그룹 책임연구원
이정익 (J.-I. Lee, jiklee@etri.re.kr)	실감소자연구본부 책임연구원/본부장
이진호 (J.H. Lee, leejinho@etri.re.kr)	소재부품원천연구본부 책임연구원/본부장

Metamaterials are artificial media that can control the properties of waves at will. Active photonic metadevice technologies cover the device and material technologies that control the visible and IR light through an external signal (mainly an electrical signal). The application areas of active photonic metadevices are tremendous for example holography, active HOE, bio imaging, IR imaging, telecommunication, and optoelectronic devices. In this paper, the technical trends and prospects of active metamaterials, active meta holography, active meta devices, nano-optical telecommunication devices, and IR imaging meta devices are reviewed.

* DOI: 10.22648/ETRI.2018.J.330609

* 본 연구는 과학기술정보통신부의 지원을 받아 수행하였음.



본 저작물은 공공누리 제4유형
출처표시+상업적이용금지+변경금지 조건에 따라 이용할 수 있습니다.

I. 서론

세계적으로 인기를 끌었던 영화, 해리포터 시리즈에는 투명 망토가 등장한다. 투명망토는 자연계에 존재하는 물질로는 불가능한 일이었기에, 마법의 힘으로 구현되는 것으로 여겨져 왔다. 그런데, 이러한 투명망토가 메타물질을 이용하면 원리적으로는 구현 가능하다. 즉, 투명망토를 구현하기 위해서는 자연계에서는 존재하지 않는 음의 굴절률을 가지는 소재가 필요한데, 인공적으로 제작한 메타물질에서는 이러한 음의 굴절률 구현이 가능하다는 것이다.

메타 소재에 대한 초보적인 연구는 19세기 후반에 시작되었지만, 이론적인 연구는 1967년 Victor Veselago가 음의 굴절률을 가지는 물질에 대한 연구를 발표한 것이 시작이다. 이 연구에 따르면, 음의 굴절률을 가지는 물질에서 전자기파의 위상 속도 벡터는 자연계의 물질과는 달리 포인팅 벡터와 반대방향이 되게 된다[1]. John Pendry는 최초로 이러한 물질을 구성할 수 있는 방법을 제안하였다. 그 방법은 정렬된 금속선과 금속을 이용하는 것이었다[2]. 2000년 Smith 등은 실험적으로 증명하였다[3].

2002년에는 이러한 음의 굴절률을 가지는 물질을 배선내에 소자 형태로 만든 결과가 발표되었고, 2003년에는 복소 굴절률이 음의 값을 가지는 소재와 플랫폼에 의한 이미징에 실험이 발표되었으며, 2006년에는 마이크로웨이브 영역에서 최초로 투명 망토가 구현되었다[4].

그 이후로 슈퍼 렌즈[5], 하이퍼 렌즈[6], 광학 회로[7], 적외선 영역에서의 음의 굴절률[8], 카이럴 광학[9] 등 새로운 결과들이 이어지고 있다. 이렇게 새로운 결과들이 가능한 이유는 메타소재가 자연계의 소재에서 구현 불가능한 특성을 보이고 있기 때문이다. 이를 이용하면 소재의 경우에는 인공 자성체, 음의 굴절률, '0'의 굴절률을 구현하는 것이 가능하고 소자 관점에서는 더 작고 가볍고 얇으면서도 성능이 뛰어나게 할 수 있다.

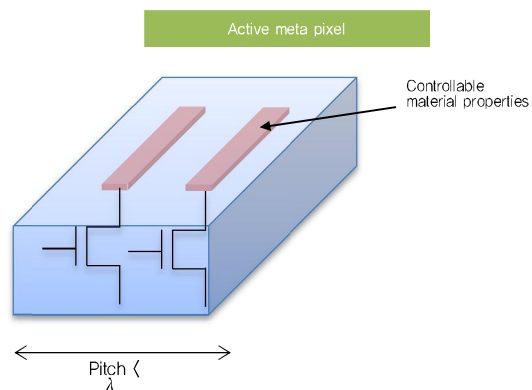
II. 기술 개요

이렇듯 메타물질은 자연계의 소재로는 구현 불가능한 성질을 구현하는 것이 가능한데, 파동이 진행하는 매질을 메타물질로 구성하여 파동의 특성을 제어하게 된다. 이를 위해서는 파동의 파장 이하 크기에서 복합 구조를 가지는 매질을 구성해야 한다. 전자기파뿐만 아니라 음파와 같은 기계적 파동에도 적용이 가능하여 적용 범위가 매우 광범위하다.

이중에서 전자기파의 경우에는 파급효과가 지대하여 많은 연구가 진행되어 왔으나, 현재까지는 주로 파장이 큰 RF나 THz 영역에서의 응용이 활발하다. 파장이 짧은 적외선이나 가시광선 영역의 경우 파장 이하 구조체를 구현하기 위해서는 나노 수준의 패턴 형성이 필요하다. 대면적으로 복잡한 나노 패턴을 형성할 수 있는 기술은 최근 들어서야 본격적으로 개발되고 있기 때문이다.

그런데, 나노 수준의 패턴을 형성하여 가시광 영역에서 메타물질을 구현했다 하더라도, 제작할 때의 특성을 변경하는 것이 불가능한 수동소자로의 제작만이 가능했다. 이에 비하여 입력신호에 따라 광파 제어 특성의 변화가 가능한 능동소자의 경우에는 응용범위를 더욱 크게 확대될 수 있는 장점이 있다.

가시광 혹은 적외선 영역에 대응 가능한 능동 광메타 디바이스[(그림 1) 참조]의 응용범위가 큰 이유는 일



(그림 1) 능동 메타 픽셀 개념도

반적으로 사용되고 있는 광전 소자가 대부분 가시광 혹은 적외선 영역대의 광파를 사용하고 있기 때문이다.

홀로그래프와 같은 3D 디스플레이 기술, 가시광 이미징 기술, 적외선 이미징 기술, 광기반 초고속 통신 기술 등 여러 영역에서 능동 광메타 디바이스는 혁신을 가져올 것이다. 이러한 기술적 혁신은 자연계에 존재하지 않는 메타물질을 적용하는 것이기에 각 분야에서의 기술적 한계를 돌파하는 기술이 될 수 있다.

특히, 홀로그래프의 경우에는 공간광변조기에 능동 광메타 기술이 적용될 경우, 지금까지 기술적 한계로 지목 되어왔던 가시광 파장 이하 피치 픽셀과 복소변조 구동 방식이 동시에 구현될 수 있다. 현재 디지털 홀로그래피에 사용된 공간광변조기의 경우 수 마이크로미터 수준의 픽셀 피치를 제공하였기 때문에, 재현되는 홀로그래프 영상의 시야각이 10도 이하로 제한되었으며, 광변조 방식도 진폭변조나 위상변조 방식으로 제한되어 홀로그래프 영상에서의 노이즈 문제를 근본적으로 안고 있었다. 이러한 한계를 극복하지 못한 것은 광변조에 사용되는 소자가 액정 소자나 MEMS 소자등으로 파장이하의 영역에서 크로스톡으로 구동이 어렵거나 구현자체가 불가능에 가까웠으며, 자연계에 존재하는 소재 중 위상과 진폭을 각각 독립적으로 제어하는 소재가 부재하였기 때문이다. 이에 비하여 메타물질의 경우 나노 구조를 이용하여 위상과 진폭을 독립적으로 변조하는 것이 가능하며, 나노구조체를 이용하므로 픽셀 간의 간섭도 원천적으로 차단하는 것이 가능하다. 최근 수동소자 혹은 단순 스위칭 소자 수준에서 광메타 기술을 이용한 홀로그래프 구현에 대한 연구들이 시작되고 있다.

다른 기술 영역에서도 기존 소재의 기술적 한계를 돌파할 수 있는 방법으로 광메타 기술이 제안되고 연구되기 시작하고 있다.

다음장에서는 각 기술영역에서의 능동 광메타 기술에 대한 소개와 전망을 담도록 한다.

III. 기술 동향

1. 메타 소재 기술

메타물질은 파장보다 작은 크기를 가지는 구조에 따라 물성을 새롭게 구현할 수 있는 기술로 이때, 메타물질의 구조의 형상 등을 바꾸어 물성을 자유롭게 조절할 수도 있다. 지금까지 메타물질을 이루는 소재는 대부분 Au, Ag 등의 귀금속 소재를 주로 사용하여 연구가 진행되었다. 이러한 Au, Ag 등의 금속 소재는 가시광 파장 영역에서 국소 표면 플라즈몬 공진 특성(LSPR) 등을 이용한 다양한 메타물질로 발표되었다.

하지만, 이러한 Au, Ag 등의 금속 소재의 경우, 손실이 큰 문제점이 있고 유전특성 등의 물성이 대부분 비슷하며 몇몇 개로 정해져 있어 이를 이용하여 구현된 메타물질 특성의 자유도가 제한되어 있다는 문제점이 있게 된다. 특히 최근에 메타물질의 응용분야가 넓어짐에 따라 적용분야에 따라 다양한 특성이 요구되게 되며 이를 해결하기 위한 메타물질에 적용될 수 있는 새로운 물질 개발이 많은 관심을 받고 있다. 특히, 홀로그래피, 광집적소자 등 빠르게ダイ나믹한 특성 변화가 요구되는 소자 등에 메타물질이 적용되기 위해서는 외부 신호에 따른 유전 특성이 자유롭게 변하는 능동 메타물질 소재 개발이 필요하게 된다. 본고에서는 이러한 새로운 메타물질 소재에 대해 살펴보고자 한다.

새로운 메타물질 소재 기술로 우선 근적외선 파장에서 저손실 특성을 보이는 투명 전도성 산화물 소재(TCO)와 전이금속 질화물(nitride) 소재 기술 등이 있다. 투명 전도성 산화물 소재로는 ITO, AZO 등이 있으며, 기존 금속 소재에 비해 근적외선 파장 영역에서 손실값이 매우 낮다는 장점을 가지고 있다. 예를 들어 2 μ m 파장 영역에서 ITO의 경우 손실값이 0.8로 Ag에 비해 6배 이상 낮은 손실 특성을 보이게 된다[10]. 이러한 특성을 이용하여 나노광회로 필터 등 다양한 메타물질 응용 연구가 보고되었다[11], [12]. 전이금속 질화물 소재

의 경우, 대표적으로 TiN 등이 있으며, 반도체 공정이 용이하고, 열적 안정성이 매우 우수하다는 장점이 있어 많은 관심을 받고 있다[13]. 최근 이를 이용한 다양한 메타물질 응용이 보고되었다[14], [15].

그래핀 소재 또한 마이크로파, 테라헤르츠, 적외선 대역용 메타물질 소재로 활발히 연구가 되고 있으며 매우 얇은 박막으로도 메타물질 제조가 가능하고, 전기적 신호에 따라 약간의 특성 조절이 가능한 장점이 있어서 마이크로파, 테라헤르츠 가변 메타물질 등에 응용 연구가 진행되고 있다[16], [17].

또 다른 새로운 메타물질 소재 기술로 유효매질 메타소재 기술이 있다. 이는 파장보다 매우 작은 크기를 가지는 소재의 조합을 통하여 새로운 물성을 가지는 유효매질을 구성하는 방법으로 조합에 따라 다양한 특성을 구현할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 소재로는 금속/유전체 조합, 금속-반도체 조합, 금속-금속 조합 등이 가능하며 소재의 구성비뿐만 아니라 구성되어 있는 형태 등에 따라 물성이 조절될 수 있다.

우선 두 가지 이상의 금속을 이용하여 합금을 제작하여 유효매질의 물성을 조절하는 방법이 있다. Au-Ag 이중합금소재, Ag-Au-Cu 삼중합금소재 등의 이중 금속 소재를 각기 다른 조성비로 제작하게 되면, 조성에 따라 물질의 유전특성이 달라지게 되어 이를 메타물질에 적용하는 연구가 일부 보고되었다[18], [19]. ETRI에서는 최근 조절가능한 물성을 가지는 Au-Ag 이중 메타소재 및 이를 이용한 대면적 메타물질 제조 기술을 보고하였다[20].

또한, 금속 및 유전체를 조합하여 금속 특성을 줄인 유효매질을 제조하는 방법이 있으며, 이를 이용하여 Nanoporous 형태의 메타소재가 연구되고 있다. 대표적으로 자이로이드 형상의 금속 소재, 나노입자를 이용한 메타소재, 디웨팅 형상 등을 가지는 나노소재 등이 발표되었고 형상 및 구조에 따라 새로운 특성을 보여 메타물질 소재 플랫폼으로 적용될 수 있는 가능성이 보고되었

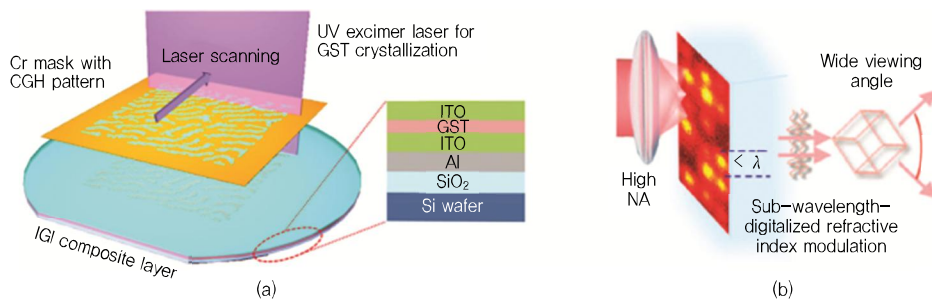
다[21]-[23].

특히, 나노입자 기반 메타물질의 경우, 합성을 통하여 수십 나노 이하 크기의 금속 소재의 제조가 쉽고, 형상, 조성 등의 소재 조절이 용이하며, 나노임프린트 공정 등과 접목하여 메타물질을 제작하는데 매우 유리한 장점을 가지고 있어 유력한 새로운 메타소재 플랫폼으로 주목을 받고 있다.

마지막으로 능동 메타소재 기술이 있다. 능동 메타소재 기술이란 외부 신호에 따라 능동적으로 특성이 변하는 능동 메타물질을 이루는 소재 기술로 대표적인 소재로는 현재 GeSbTe(GST) 등의 칼코지나이드 계열 상변화 물질 또는 금속-절연체 상변화(MIT) 특성을 보이는 Vanadium oxide 등을 이용하여 연구가 진행되고 있다 [24], [25]. GST 등의 상변화 소재의 경우, 전기적, 광학적 신호에 따라 능동적으로 결정질 및 비정질상을 조절할 수 있으며, 이러한 상에 따른 유전특성 등 광학적 특성이 변화하여 메타물질의 특성을 조절할 수 있게 된다. 이를 이용하여 ETRI에서는 홀로그래밍 등에 활용하여 연구를 진행하고 있다.

2. 능동 메타 홀로그래피 기술

빛의 공간적인 세기 및 위상 분포의 기록과 재생이 가능한 홀로그래피 기술은 디스플레이, 의료, 계측 등 다양한 산업 분야에 효과적으로 활용될 것으로 기대된다. 기존의 아날로그 홀로그래피 기술은 홀로그램 제작을 위한 기록과정이 까다로울 뿐만 아니라 동영상 재생할 수 없다는 한계점이 존재한다. 반면, 디지털 홀로그래피 기술은 그러한 제약에서 자유롭기 때문에 전자 소자의 발전과 더불어 최근 그 중요성이 점차 증가하고 있다. 디지털 홀로그래피의 재생을 위해서는 공간 광 변조 소자와 같이 빛의 공간적인 세기 또는 위상 분포를 변조해 줄 수 있는 장치가 요구된다. 특히, 홀로그래피 기술의 대표적 응용 결과물인 차세대 3차원 디스플레이 구



(그림 2) (a) 상 변화 물질 및 (b) 그래핀 기반의 재구성 가능한 홀로그램

[출처] Reprinted from S.-Y. Lee et al., “Holographic Image Generation with a Thin-Film Resonance Caused by Chalcogenide Phase-Change Material,” *Sci. Rep.*, vol. 7, 2017, Article no. 41152, CC BY 4.0.

[출처] Reprinted from X. Li et al., “Athermally Photoreduced Graphene Oxides for Three-Dimensional Holographic Images,” *Nature Commun.*, vol. 6, 2015, Article no. 6984, CC BY 4.0.

현을 위해서는 가시광 영역에서 고품질의 공간 광 변조가 가능한 소자가 필수적이라 할 수 있다. 이를 위해서는 가시광 파장 수준 또는 그 이하의 픽셀 피치를 갖는 공간 광 변조 소자가 필수적이라고 할 수 있으나, 이는 현존하는 세계 최고 수준의 상용 디스플레이 기술을 활용해도 달성하기 어려운 수준이다.

이러한 기술적 한계를 극복하기 위한 새로운 접근 방법 중 하나로 메타표면과 같은 메타구조 기반의 홀로그램 제작 기술이 최근 많은 주목을 받고 있다[26]–[29]. 기본적으로 메타 홀로그램의 픽셀 피치는 해당되는 동작 영역의 파장보다 작게 설계되기 때문에 넓은 시야각을 특징으로 하며, 각 픽셀에서 진폭과 위상의 동시 변조 또한 가능하다. 하지만 가시광 영역에서의 능동형 메타구조 구현은 여전히 매우 도전적인 과제라 할 수 있는데, 이는 매우 작은 픽셀 피치(~200nm 이하)에 대응되는 각 미세 픽셀의 독립적인 실시간 구동이 요구되기 때문이다. 이러한 이유로, 현재의 기술 수준에서는 제한적으로 능동형 특성을 갖는 메타 홀로그램에 대한 결과들이 보고되기 시작하였다.

능동형 홀로그램의 구현을 위해서는 외부 신호에 의해 광학적 특성을 변화시킬 수 있는 가변형 물질이 필수적인데, 대표적인 가변형 물질로 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 와 같은 상 변화 물질이 있다. 최근 반사형 공진 구조에 매우 얇은

상변화 물질 층을 도입하고, 광학적 또는 전기적 방법으로 데이터를 기록함으로써 재구성 가능한 홀로그램을 구현한 결과가 보고되었다[30], [31]. [(그림 2a) 참조].

2차원 물질인 그래핀은 산화/환원 정도에 따라 광학적 특성이 달라지는데, 이를 활용하여 재구성이 가능한 홀로그램이 제안되었다. 이 방법은 높은 에너지의 펄스 초 펄스 레이저를 활용하여 산화 그래핀의 표면을 국소적으로 환원시킴으로써 홀로그램 패턴을 기록하며, 해당 영역을 다시 산화시킴으로써 기록된 패턴의 삭제 또한 가능하다[32], [(그림 2b) 참조].

앞서 소개된 결과들의 경우 홀로그램 데이터의 재구성이 가능하지만, 전기적 신호에 의해 각 픽셀이 실시간으로 제어되는 능동 소자의 수준에는 미치지 못한다. 이러한 단점을 극복하고자, 최근 마이크로파 영역에서 실시간으로 임의의 홀로그램 재생이 가능한 능동형 메타표면 소자의 구현 결과가 발표되었다. 이는 각 픽셀에 포함된 다이오드 소자가 해당 픽셀의 마이크로파 산란 특성을 스위칭 함으로써 이루어진다[33]. 하지만 이 결과 또한, 상대적으로 메타 구조의 제작이 수월한 마이크로 주파수 영역에 대해 구현된 것으로, 적외선 및 가시광 영역에서의 구현을 위해서는 다양한 관련 기술들이 개발되어야 한다. 이러한 맥락에서, 실시간 구동이 가능한 능동형 메타 홀로그램 원천 기술을 개발하려는 노력

이 최근 전 세계적으로 활발히 이루어지고 있다.

3. 능동 메타 소자 기술

수동 메타 소자 기술은 가시광선 파장보다 작은 피치를 가진 구조로 이용하여 고정된 입체 영상이나 새로운 광학소자를 잘 표현할 수 있다. 그러나 능동 메타 소자는 동적으로 특성을 변화시킬 수 있다는 장점이 있어서 수동 메타 소자보다 관심이 높지만, 가시광선 파장보다 작은 피치 및 가시광선 주파수에서 동작하는 스위칭 소자의 어려움으로 인해 능동 메타 소자를 구현하는 것은 커다란 도전으로 남아 있다.

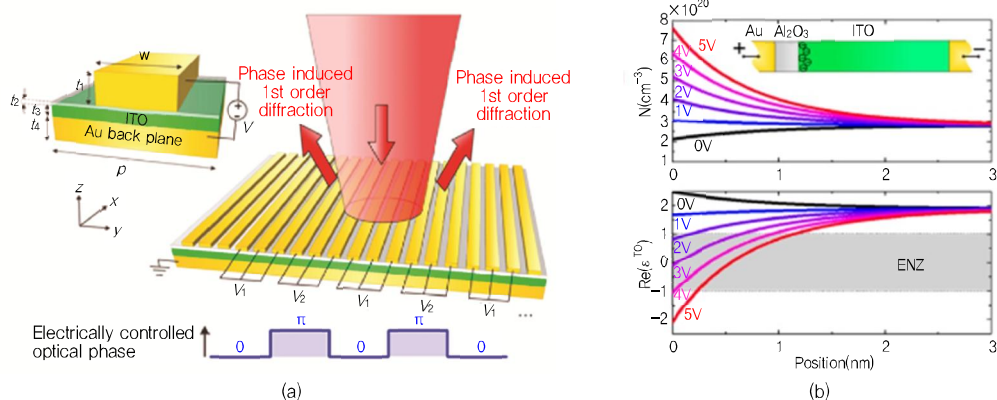
지금까지 보고된 최근에 연구되고 있는 능동 메타 소자 기술은 크게 3가지로 나누어 볼 수 있다. 첫 번째는 상전이 물질을 이용하여 가시광선 영역에서 변조하는 기술, 두 번째는 반도체 박막에 전기장을 가하여 적외선 영역에서 변조하는 기술, 세 번째는 다이오드를 집적하여 Microwave 영역에서 변조하는 기술이다.

이 외에도 최근 전기화학 기술의 일종인 가역전착 기술을 이용한 메타 소자에 대한 연구가 시도되고 있다.

Q. Wang 등[30]은 GST($\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$) 박막을 이용하여 능동 메타 소자를 형성하였다. GST 박막은 glass 온도와 녹는점 온도 사이에서 열처리를 해주면 비정질 구조

에서 결정 구조로 바뀌게 된다. 여기에 능동적으로 정보를 작성하고자 하는 위치에 femtosecond 레이저를 1.25nJ 만큼 주사하면 국부적으로 $0.59\mu\text{m}$ 크기의 비정질 영역을 만들 수 있다. 비정질 영역과 결정 영역은 광학적 특성이 많이 다르므로 이를 이용해 빛을 제어할 수 있어서 능동 메타 소자를 구현할 수 있다. ETRI[31]에서는 GST 물질에 MOSFET 을 연결하여 전기적 신호에 따라 능동적으로 GST의 구조를 제어할 수 있는 능동 메타 소자를 연구하고 있다.

K. Dong[34] 등은 VO_x (Vanadium Oxide)를 이용한 능동 메타 소자를 제작하였다. VO_x 는 68°C 근처에서 Metal-Insulator 상전이를 하면서 전자농도가 $1.9\text{E}23$ 으로 급격하게 증가하고 유전상수도 급격하게 변화하게 되는데, 이를 이용하여 능동 메타 소자 제작이 가능해진다. VO_x 는 상전이 온도 부근에서 Hysteresis 특성을 나타내기 때문에 기판의 온도를 68°C 근처에 유지하고 레이저를 이용해 $1\mu\text{m}$ 크기의 local 한 지역에 수 mW의 열을 가하면 국부적으로 열이 가해진 지역만 금속으로 상전이를 하게 된다. 레이저를 다른 지역으로 이동하게 되어도 금속으로 변한 영역은 Hysteresis에 의해 그 상태를 유지한다. 남아 있는 정보를 지우기 위해서는 기판 온도를 45° 이하로 낮추어 주면 Hysteresis 정보가 사



(그림 3) ITO 박막을 이용한 능동 메타 소자

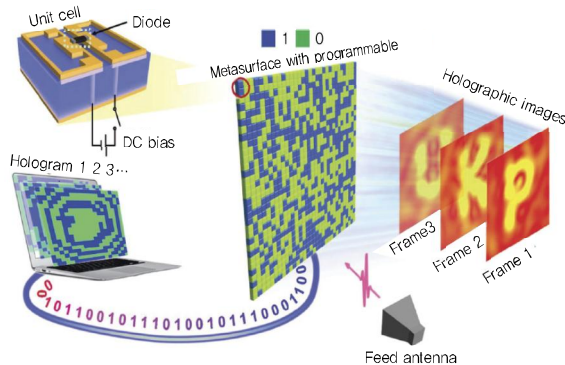
[출처] Reprinted with permission from Y.-W. Huang et al., "Gate-Tunable Conducting Oxide Metasurfaces," *Nano Lett.*, vol. 16, no. 9, 2016, pp. 5319–5325, Copyright (2018) American Chemical Society.

라지게 되어 새로운 이미지를 새길 수 있다.

Y. Huang 등[35]은 게이트 전압에 의해 위상을 180도 변화시킬 수 있는 능동 메타 소자를 만들었다(그림 3) 참조]. ITO 박막 위에 Al_2O_3 를 증착하고, 게이트 물질로 Au를 증착하여 MOS 커패시터를 형성하였다. 게이트 전극에 전압을 가하게 되면 Al_2O_3 와 ITO 계면에 전하밀도가 변하게 되는데, 이에 따라 ITO의 유전상수도 변하게 되는 원리이다. 게이트 전압이 5V 이내에서 유전 상수 실수값이 $-1 \sim 1$ 사이로 변한다. 동작하는 파장은 1,550nm 부근이다.

O. Balci 등[36]은 수동 메타 소자와 능동 그래핀 소자를 결합하여 능동 메타 소자를 형성하였다. Split Ring Resonator 주위에 그래핀 커패시터를 위치시킴으로써 SRR의 산란특성이 그래핀에 가해지는 전압에 따라 바뀌게 된다. 여기서의 동작 주파수는 수 GHz 대역이다. 제작된 소자는 전자기파의 크기를 50dB 이상, 그리고 위상을 90도 이상 변화시켰다.

L. Li 등[33]은 Microwave 영역에서 1bit 동작이 가능한 능동 메타 소자를 제작하였다(그림 4) 참조]. 다이오드를 단위 픽셀 안에 집적함으로써 외부 전압이 가해질 때 단위 픽셀 안의 2개의 메탈 구조물이 연결되어 메탈 구조의 공진 주파수가 변경되고, 이에 따라 산란파의



(그림 4) 다이오드를 이용한 능동 메타 소자

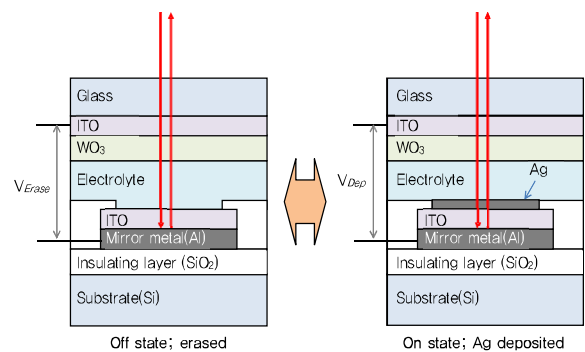
[출처] L. Li et al., "Electromagnetic Reprogrammable Coding-Metasurface Holograms," *Nature Commun.*, vol. 8, no. 1, 2017, Article no. 197, CC BY 4.0.

위상이 7.8GHz에서 180도로 크게 변한다. Microwave 영역에서 동작하기 때문에 단위 픽셀의 크기가 $6mm \times 6mm \times 2mm$ 로 커서 두 개의 메탈 구조 사이에 다이오드를 위치시킬 수 있었다. 가시광선 영역에서 동작하기 위해서는 Submicron 크기의 다이오드를 단위 픽셀 안에 배치하는 것이 필요하다.

C. Huang 등[37]은 PIN diode 2개를 이용하여 2bit로 조절이 가능한 능동 메타 표면소자를 발표하였다.

가역전착 기술은 전기화학적 기술의 일종으로 전도성 전극의 표면에 Ag 등의 금속을 가역적으로 증착/소거할 수 있는 기술이다[38]-[40]. 증착된 Ag는 우수한 금속의 특성을 가지며 광학적으로 금속 반사의 특징을 보인다. 이 기술을 이용하여 거울-투명 소자 또는 거울-투명-흑색의 전환가능한 소자를 구성할 수 있다[39], [40].

이 기술을 능동 메타표면 홀로그램 소자에 적용하고자 하는 연구가 현재 ETRI에서 진행되고 있다. (그림 5)는 연구 중인 소자 구조와 동작 개념을 보여주고 있다[41]. 소자는 하부 거울층, 하부 투명 전극층, 전해질, 대향 전극층, 상부 투명 전극층 등이 수직으로 적층된 형태를 가진다. 좌측 그림은 Ag가 증착되지 않은 구조이고, 우측 그림은 Ag가 증착된 구조이다. Ag가 증착되지 않은 경우 입사광은 하부 거울층에서 반사되게 된다. 반면에

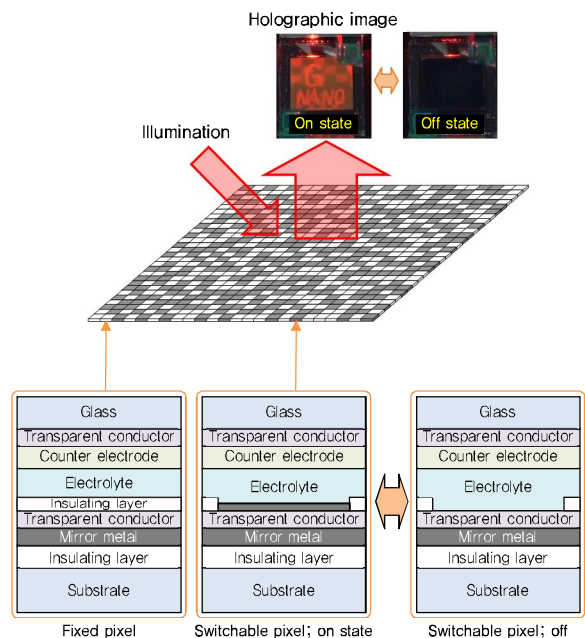


(그림 5) 가역 전착 기술을 이용한 위상 변조 소자의 개념도

[출처] Reprinted from S.M. Jo et al., "Switchable Holographic Device Using Electrochemical Method," *Nanophotonics Micro/Nano Optics International Conf.*, Oct, 2018.

충분히 두꺼운 Ag가 증착되면 입사광은 증착된 Ag층에서 반사되게 된다. 이 두 경우에 있어 반사광은 경로 차이에 의한 위상차를 가지게 된다. 이 위상 차이에 의해 홀로그래피 구현되게 된다. 증착되는 Ag의 두께가 충분히 두껍지 않을 경우에는 증착되는 Ag, 투명전극층(ITO) 그리고 하부 거울층이 형성하는 공동(cavity)에 의한 공진 현상이 있으며, 소자의 변조 특성은 Ag의 증착에 따른 가변 cavity 효과에 의해 묘사되어질 수 있다. (그림 5)의 소자는 Ag 증착/소거 상태 모두 거울 반사의 특징을 가지므로 높은 반사율을 가질 것으로 기대된다. 그리고, 가역전착 기술은 근본적으로 전류구동 소자이므로 전압의 확산에 의한 간섭 현상이 최소화될 수 있어 소자 피치 미세화의 장벽을 극복할 수 있는 기술로 기대된다.

ETRI는 제안된 기술을 적용하여 1 μ m 피치의 on/off 스위칭이 가능한 홀로그래피 소자를 구현하였다.



(그림 6) 가역 전착 기술을 이용한 홀로그래피 소자의 구조와 동작 영상

[출처] Reprinted from S.M. Jo et al., "Switchable Holographic Device Using Electrochemical Method," *Nanophotonics Micro/Nano Optics International Conf.*, Oct, 2018.

(그림 6)은 소자의 구조와 구동 영상을 보여주고 있다 [41]. 소자에서 동작하지 않는 픽셀들의 전극은 SiO₂ 절연막으로 막았으며, 동작 픽셀들의 전극에서는 SiO₂ 절연막을 제거하여 Ag의 증착과 소거동작이 가능하도록 하였다. 소자는 Ag가 증착되지 않은 off 상태에서 거울의 특성을 보이며 Ag가 증착된 on 상태에서는 홀로그래피 영상을 보인다.

가역전착 기술을 이용한 광변조 소자는 능동구동이 가능한 방식으로 제안되고 있는 메타물질 기술 중에서 가시광 영역에서 가장 큰 변조가 가능한 기술이기 때문에 향후 가시광 영역에서의 능동 메타표면 소자로의 적용이 기대되고 있다.

4. 나노 광신호 통신소자 기술

전파 및 마이크로 웨이브 안테나는 휴대전화, 위성통신 및 전자기 복사(electromagnetic radiation)를 사용하는 다른 많은 장치에서 사용할 수 있는 기술이다. 광학 안테나는 아직 그 기술이 기초 연구단계에 머물러 있지만, 광학 복사(radiation)는 렌즈와 거울을 이용해 파면(wavefronts)을 방향 수정하여 조정할 수 있다. 결과적으로 회절 때문에 광필드(Optical field)가 광학파장보다 훨씬 작은 크기로 국한할 수 없는 것으로 보인다. 광안테나는 나노 크기 장치의 작은 치수와 광학 파장과 관련된 길이 범위 사이의 불일치에 대한 해결책이다.

광안테나는 수십nm 급의 나노 입자로 제작되는데, 이 나노 입자는 들어오는 광학 복사를 양자 수신기(단일 분자)에 집중시킨다. 플라즈몬 물질로 구성된 광안테나는 강한 광 위치 및 작은 모드 체적을 제공하기 때문에 단일광자 소스에서 광검출기에 이르는 응용분야에서의 감도 및 신호대 잡음비를 향상시킨다. 광안테나는 나노미터 규모의 빛을 효율적으로 제어 및 조작하고 방향 방출을 할 수 있다.

광안테나는 particle 안테나, gap 안테나 및 Yagi-Uda 안테나를 비롯한 다양한 광안테나 설계가 연구되

었고, 이 안테나의 대부분은 빛이 들어오거나, 나가는 부분을 기본으로 연구되었는데, 레이저 광은 에미터(emitter)(분자 또는 양자점)를 여기(excitation)하기 위해 보내지고 빛은 형광이나 산란 형태로 보내진다. 기존의 무선 주파수 및 마이크로파 시스템에서 안테나가 전자기 복사를 전류로 변환하거나 전류를 전자기 복사로 변환하는데 사용되며, 광 복사를 전류로 변환하는 연구는 기술개발 초기 단계이다[42].

Harvard University의 Federico Capasso와 Vinton Hayes[43] 교수팀은 지금까지 Snell의 법칙은 한 물질에서 다른 물질로 빛이 통과할 때 물질 사이의 경계를 따라 급격한 상변화가 없다는 것을 암시했지만, 안테나 어레이를 기반으로 하는 메타 물질을 사용하여 빛의 위상과 전파 방향이 크게 바뀔 수 있음을 보여주었다. 특히, 통신에 이용되는 $1.55\mu\text{m}$ 파장에서 이용 가능하다는 것을 확인하였으며, Purdue Birck Nanotechnology Center의 Vladimir Shalaev[44] 교수는 플라즈몬 구조를 포함하는 메타물질 나노 안테나를 이용하여 빛이 물질 간의 경계면을 통과하는 빛의 운동량 보존에 필요한 전파 방향을 변화시켜 보다 강력한 현미경, 컴퓨터 및 통신시스템을 가능하게 하며, 40nm 의 안테나 폭을 만들어서 전송하는 빛의 파장보다 약 50배 작은 초소형 플라즈몬 나노 안테나 층을 통해 근적외선 영역인 $1\sim 1.9\mu\text{m}$ 범위에서 빛을 전송할 수 있음을 입증하였다.

프랑스의 CNRS와 Aix Marseille Universite의 과학자들은 형광성 유기 냉각제와 36nm 직경의 금 입자를 짙은 인조 DNA 가닥속에 끼워 넣어서 간단하고 사용하기 쉬운 광학 안테나를 개발하였다. 형광분자는 양자 소스처럼 움직이며, 안테나에 광자를 제공하는 반면 빛과 에미터(emitter) 사이의 상호작용은 금 나노입자에 의해 증폭된다. 그래서, 단백질보다 작고 측정하기 어려운 DNA나 RNA의 민감한 모니터링에 응용할 수 있다.

Lawrence Berkeley National Lab.의 Eli Yablonovitch등[45]은 전력소모가 많고 많은 공간을 차지하는

레이저에 비해 자발적으로 더 많은 빛을 방출하는 LED와 광학적 안테나를 결합하여 자연 방출 속도가 2,500배 이상 향상되는 동시에 방출 효율을 50% 이상 유지할 수 있으며, 마이크로 칩에 안테나를 강화한 LED로 교체하면 상호연결성이 빨라 컴퓨팅 성능이 향상되는 것을 확인하였다.

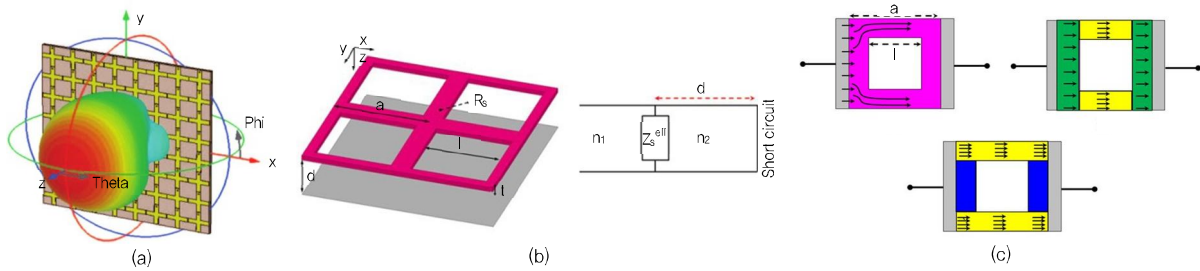
UC Berkeley의 Ming C. Wu 교수팀[46]은 자연 발생 수명이 길기 때문에 변조 속도가 낮은 기존의 반도체 발광다이오드(LED)를 광안테나에 결합하여 자연 발광물이 레이저보다 더 빨리 직접 변조할 수 있는 안테나-LED에 대한 설계, 제작 및 실험 결과에 대해 발표하였다. Cavity 지원 슬롯 안테나를 갖춘 최적화된 안테나-LED가 고효율에서 100GHz 이상의 직접 변조 속도를 달성할 수 있다는 것을 보여주었고 레이저보다 더 빠른 안테나-LED가 구현된다는 것을 보여주었다.

ITMO university의 연구팀[47]은 광발광(photoluminescence)을 갖는 발광 나노 안테나를 만들기 위해 높은 굴절률을 가진 하이브리드 페로브스카이트(perovskite) 필름을 이용하여 실온에서 $530\sim 770\text{nm}$ 파장 범위의 광원을 제작하였다.

광안테나는 near-field 현미경과 고해상도의 생체 의학 센서 등에 이용되고 있으며, 태양전지, 분자 및 생체 의학 센서, 광학 통신 및 광학 트위저(tweezers) 등 향후 많은 분야에 적용하고자 하는 노력이 진행 중이다.

5. 적외선 이미징 메타 소자 기술

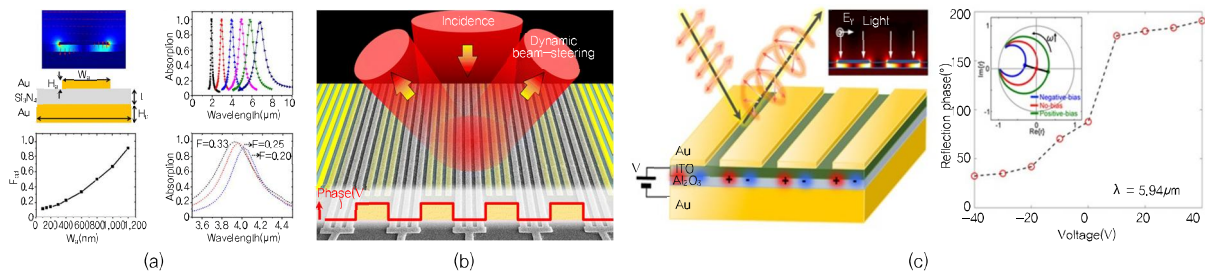
적외선은 파장 $0.7\sim 1,000\mu\text{m}$ 의 전자기파로 열 추적이나 천문/기상 관측 분야는 물론, 인체의 열이나 사물의 야간 영상 확보가 가능하여 보안, 감시, 의료/보건, 화학, 바이오, 환경, 시설 및 제조 공정 모니터링과 같이 다방면에서 사용되고 있다. 최근에는 IoT, 로봇, 드론, 자율주행, 안면 인식 등의 발전으로 적외선 응용이 더욱 확대되고 있으며 센서와 부품에 대한 기술적 요구 수준



(그림 7) (a) 메타표면 기반 안테나 및 (b) 열 질량 조절 구조와 (c) 전기 특성

[출처] Reprinted from M.E. Badawe, T.S. Almoneef, and O.M. Ramahi, "A True Metasurface Antenna," *Sci. Rep.*, vol. 6, 2016, Article no.19268, CC BY 4.0.

[출처] Reprinted from J.-Y. Jung et al., "Infrared Broadband Metasurface Absorber for Reducing the Thermal Mass of a Microbolometer," *Sci. Rep.*, vol. 7, 2017, Article no. 430, CC BY 4.0.



(그림 8) 전압 인가를 통한 메타표면의 흡수 대역 천이, 분극 및 반사광 특성 조절

[출처] Reprinted with permission from F. Yi et al., "Voltage Tuning of Plasmonic Absorbers by Indium tin Oxide," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 102, 2013, Article no. 221102.

[출처] Reprinted with permission from Y.W. Huang et al., "Gate-Tunable Conducting Oxide Metasurfaces," *Nano Lett.*, vol. 16, no. 9, 2016, pp. 5319–5325. Copyright (2016) American Chemical Society.

[출처] Reprinted with permission from J. Park et al., "Dynamic Reflection Phase and Polarization Control in Metasurfaces," *Nano Lett.*, vol. 17, no. 1, 2017, pp. 407–413. Copyright (2017) American Chemical Society.

또한 더욱 높아지고 있다. 이 가운데 적외선 센서 소재의 열 질량(thermal mass)이 커서 감지 속도가 느린 열화상 분야에 대해 메타 기술을 적용하는 연구들이 진행되어 왔다. 이러한 물성 한계 극복을 위해 공진 특성의 변화를 이용하는 메타 안테나[48] 연구와 메타표면을 이용하여 적외선 흡수율을 유지하면서 열 질량을 감소시키는 연구 결과도 발표되고 있다[49], [(그림 7) 참조].

한편 메타표면에 외부 자극을 인가하여 흡수 파장을 조절할 수 있는 특성을 이용하여 동일한 센서로 다양한 파장의 적외선을 검출하는 tunability 향상 연구가 활발하게 진행되고 있다. 외부 자극으로는 열, 응력, 광, 전기 등 다양한 방법이 연구되고 있으나 응용성과 기존 기

술과의 집적화 측면에서 전압을 인가하는 방법이 가장 기대를 모으고 있다[50]–[52]. 현재는 흡수 파장의 천이(shift) 정도가 수 십 나노미터 이하로 작아 응용에 제약이 따르고 있어 이를 극복할 수 있는 적외선용 메타표면 기술 연구가 필요한 상황이다. 이러한 능동형 광 메타 적외선 기술을 적용할 수 있는 사례로서 CMOS 이미지 센서에 적외선 메타 센서를 집적하여 하나의 카메라로 주야간 시야와 영상 확보가 모두 가능한 영상 기술을 들 수 있다. 또한, 자율주행차, 드론, 안면인식, 홀로그래피 영상 시스템에 대한 응용이 크게 활성화될 것으로 예상되며 산업과 시장 측면에서도 획기적인 성장 모멘텀을 가져올 것으로 기대된다[(그림 8) 참조].

IV. 결론

능동 광메타 디바이스 기술은 2000년대 초반부터 시작된 메타소재 기술에서 한 단계 도약이 필요한 기술로 능동 광메타소재 기술부터 이를 이용한 어레이 소자 기술, 광전 소자 기술까지 다양한 기술 개발을 필요로 한다.

새로운 소재의 발견은 새로운 응용영역을 창출하고, 한층 심화된 소자 성능의 요구는 새로운 소재의 발견을 필요로 하고 있다. 능동 광메타 소재는 현재까지 개발된 나노기술과 반도체 기술, 디스플레이 기술의 총합으로 구현이 가능할 것으로 예상된다.

이 분야의 경우 상대적으로 기술개발 초기이기 때문에 우리나라와 다른 나라 간의 기술격차는 크지 않다고 볼 수 있다. 또한, 우리나라가 그동안 쌓아온 나노분야의 학문적 수준과, 반도체디스플레이 분야의 산업적 역량을 고려해볼 때 향후 이 분야의 연구를 이끌 수 있는 가능성은 충분히 높다고 생각된다.

따라서, 창의적인 아이디어를 바탕으로 다양한 방법으로 능동 광메타 디바이스 분야에 대한 연구를 추진하게 되면 가까운 시간내에 괄목할 만한 성과를 얻어 낼 수 있을 것이다.

이러한 기술 개발을 통하여 HDTV 수준의 화질을 가지는 광시야각 컬러 홀로그래프, 전자현미경과 대등한 해상도를 가지는 광학 현미경 등 기존에는 불가능하였던 새로운 디바이스의 출현을 기대해본다.

약어 정리

AZO	Al-doped Zinc Oxide
GST	Ge-Sb-Te
HOE	Holographic Optical Elements
IR	Infra Red
ITO	Indium Tin Oxide
LED	Light Emitting Diode
LSPR	Localized Surface Plasmon Resonance
MIT	Metal-Insulator Transition
MOS	Metal-oxide-Si

MOSFET	Metal-oxide-Si Field Effect Transistor
PIN	p-type Intrinsic n-type
RF	Radio Frequency
TCO	Transparent Conducting Oxide

참고문헌

- [1] V.G. Veselago, "The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of ϵ and μ ," *Sov. Phys. Uspekhi*, vol. 10, no. 4, 1968, pp. 509-514.
- [2] J.B. Pendry, "Negative Refraction Makes a Perfect Lens," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 85, 2000, Article no. 3966.
- [3] D.R. Smith et al., "Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 84, 2000, Article no. 4184.
- [4] D. Schurig et al., "Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies," *Sci.*, vol. 314, Nov. 2006, pp. 977-980.
- [5] N. Fang et al., "Sub-Diffraction-Limited Optical Imaging with a Silver Superlens," *Sci.*, vol. 308, Apr. 2005, pp. 534-537.
- [6] Z. Liu et al., "Far-Field Optical Hyperlens Magnifying Sub-Diffraction-Limited Objects," *Sci.*, vol. 315, no. 5819, Mar. 2007, p. 1686.
- [7] N. Engheta, "Circuits with Light at Nanoscales: Optical Nanocircuits Inspired by Metamaterials," *Sci.*, vol. 317, no. 5845, Sept. 2007, pp. 1698-1702.
- [8] J. Valentine et al., "Three-Dimensional Optical Metamaterial with a Negative Refractive Index," *Nature*, vol. 455, Sept. 2008, pp. 376-379.
- [9] J.K. Gansel et al., "Gold Helix Photonic Metamaterial as Broadband Circular Polarizer," *Sci.*, vol. 325, no. 5947, Sept. 2009, pp. 1513-1515.
- [10] G.V. Naik, V. M. Shalaev, and A. Boltasseva, "Alternative Plasmonic Materials: Beyond Gold and Silver," *Adv. Mater.*, vol. 25, no. 24, June 2013, pp 3264-3294
- [11] H. Caglayan et al., "Near-Infrared Metatronic Nanocircuits by Design," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 111, Aug. 2013, Article no. 073904.
- [12] I. Liberal and N. Engheta, "Near-Zero Refractive Index Photonics," *Nature Photon.*, vol. 11, 2017, pp. 149-158
- [13] W. Li et al., "Refractory Plasmonics with Titanium Nitride: Broadband Metamaterial Absorber," *Adv. Mater.*, vol. 26, no. 47, Dec. 2014, pp. 7959-7965

- [14] U. Guler et al., "Plasmonic Titanium Nitride Nanostructures via Nitridation of Nanopatterned Titanium Dioxide," *Adv. Opt. Mat.*, vol. 5, No. 7, Apr. 2017, Article no. 1600717.
- [15] M. Chirumamilla et al., "Large-Area Ultrabroadband Absorber for Solar Thermophotovoltaics Based on 3D Titanium Nitride Nanopillars," *Adv. Opt. Mat.*, vol. 5, no. 22, Nov. 2017, Article no. 1700552.
- [16] O. Balci et al., "Electrically Switchable Metadevice via Graphene," *Sci Adv.*, vol. 4, no. 1, Jan. 2018, pp. 1749:1–1749:9.
- [17] T.T. Kim et al., "Electrically Tunable Slow Light Using Graphene Metamaterials," *ACS Photon.*, vol. 5, no. 5, 2018, pp. 1800–1807.
- [18] T. Chung et al., "Au/Ag Bimetallic Nanocomposites as a Highly Sensitive Plasmonic Material," in *Plasmonics*, Springer US: USA, 2018.
- [19] Y. Hashimoto et al., "Au–Ag–Cu Nano-Alloys: Tailoring of Permittivity," *Sci Rep.*, vol. 6, 2016, Article no. 25010.
- [20] S. J. Kim et al., "Chemically Engineered Au–Ag Plasmonic Nanostructures to Realize Large Area and Flexible Metamaterials," *ACS Appl. Mat. Inter.*, vol. 10, no. 30, 2018, pp. 25653–25659.
- [21] D. Garoli et al., "Fractal-Like Plasmonic Metamaterial with a Tailorable Plasma Frequency in the near-Infrared," *ACS Photon.*, vol. 5, no. 8, 2018, pp. 3408–3414.
- [22] B.D. Willts et al., "Gyroid Optical Metamaterials: Calculating the Effective Permittivity of Multidomain Samples," *ACS photon.*, vol. 3, no. 10, 2016, pp.1888–1896.
- [23] A.T. Fafarman et al., "Chemically Tailored Dielectric-to-Metal Transition for the Design of Metamaterials from Nanoimprinted Colloidal Nanocrystals," *Nano Lett.*, vol. 13, no. 2, 2013, pp. 350–357.
- [24] A. Karvounis et al., "All Dielectric Phase Change Reconfigurable Metasurface," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 109, 2016, Article no. 051103.
- [25] T. Paik et al., "Solution-Processed Phase-Change VO₂ Metamaterials from Colloidal Vanadium Oxide (VO_x) Nanocrystals," *ACS Nano*, vol. 8, no. 1, 2014, pp. 797–806.
- [26] X. Ni, A.V. Kildishev, and V.M. Shalaev, "Metasurface Holograms for Visible Light," *Nature Commun.*, vol. 4, 2013, Article no. 3807.
- [27] S. Larouche et al., "Infrared Metamaterial Phase Holograms," *Nature Mater.*, vol. 11, 2012, pp. 450–454.
- [28] L.L. Huang et al., "Three-Dimensional Optical Holography Using a Plasmonic Metasurface," *Nature Commun.*, vol. 4, 2013, Article no. 2808.
- [29] G.-Y. Lee et al., "Complete Amplitude and Phase Control of Light Using Broadband Holographic Metasurfaces," *Nanoscale*, vol. 10, no. 9, 2018, pp. 4237–4245.
- [30] Q. Wang et al., "Optically Reconfigurable Metasurfaces and Photonic Devices Based on Phase Change Materials," *Nature Photon.*, vol. 10, no. 1, 2015, pp. 60–65.
- [31] S.-Y. Lee et al., "Holographic Image Generation with a Thin-Film Resonance Caused by Chalcogenide Phase-Change Material," *Sci Rep.*, vol. 7, 2017, Article no. 41152.
- [32] X. Li et al., "Athermally Photoreduced Graphene Oxides for Three-Dimensional Holographic Images," *Nature Commun.*, vol. 6, 2015, Article no. 6984.
- [33] L. Li et al., "Electromagnetic Reprogrammable Coding-Metasurface Holograms," *Nature Commun.*, vol. 8, no. 1, 2017, Article no. 197.
- [34] K. Dong et al., "A Lithography-Free and Field-Programmable Photonic Metacanvas," *Adv. Mater.*, vol. 30, no. 5, Feb. 2018, Article no. 1703878.
- [35] Y.-W. Huang et al., "Gate-Tunable Conducting Oxide Metasurfaces," *Nano Lett.*, vol. 16, no. 9, 2016, pp. 5319–5325.
- [36] O. Balci et al., "Electrically Switchable Metadevices via Graphene," *Sci Adv.*, vol. 4, no. 1, Jan. 2018, Article no. 1749.
- [37] C. Huang et al., "Dynamical Beam Manipulation Based on 2-bit Digitally-Controlled Coding Metasurface," *Sci Rep.*, vol. 7, 2017, Article no. 42302.
- [38] J.P. Ziegler and B. M. Howard, "Applications of Reversible Electrodeposition Electrochromic Devices," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 39, no. 2–4, Dec. 1995, pp. 317–331.
- [39] S. Araki et al., "Electrochemical Optical-Modulation Device with Reversible Transformation Between Transparent, Mirror, and Black," *Adv. Mater.*, vol. 24, no. 23, June 2012, pp. OP122–OP126.
- [40] S.M. Cho et al., "New Switchable Mirror Device with a Counter Electrode Based on Reversible Electrodeposition," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 179, June 2018, pp. 161–168.
- [41] S.M. Cho et al., "Switchable Holographic Device Based on Reversible Electrodeposition," *Adv. Mater. Technol.*, 2018, <https://doi.org/10.1002/admt.201800478>

- [42] L. Novotny, N. van Hulst, "Antennas for light," *Nat Photonics*, vol. 5, Fed. 2011, pp 83-90.
- [43] F. Capasso et al., "Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction," *Sci*, vol. 333, no. 6064, Oct. 2018, pp. 333-337.
- [44] V.M. Shalaev et al., "Broadband Light Bending with Plasmonic Nanoantennas," *Sci*, vol. 335, no. 6067, Jan. 2012, p. 427.
- [45] E. Yablonovitch et al., "Optical Antenna Enhanced Spontaneous Emission," *Proc. National Academy Sci United States of Am*, vol. 112, no. 6, Jan. 2015, pp. 1704-1709.
- [46] S. Fortuna, "Integrated Nanoscale Antenna-LED for On-Chip Optical Communication," Technical Report, UCB/EECS-2017-144, 2017.
- [47] Y.S. Kivshar et al., "Light-Emitting Halide Perovskite Nanoantennas," *Nano Lett.*, vol. 18, no. 2, 2018, pp. 1185-1190.
- [48] M.E. Badawe, T.S. Almoneef, and O.M. Ramahi, "A True Metasurface Antenna," *Sci Rep.*, vol. 6, 2016, Article no. 19268.
- [49] J.-Y. Jung et al., "Infrared Broadband Metasurface Absorber for Reducing the Thermal Mass of a Microbolometer," *Sci Rep.*, vol. 7, 2017, Article no. 430.
- [50] F. Yi et al., "Voltage Tuning of Plasmonic Absorbers by Indium tin Oxide," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 102, 2013, Article no. 221102.
- [51] Y.W. Huang et al., "Gate-Tunable Conducting Oxide Metasurfaces," *Nano Lett.*, vol. 16, no. 9, 2016, pp. 5319-5325.
- [52] J. Park et al., "Dynamic Reflection Phase and Polarization Control in Metasurfaces," *Nano Lett.*, vol. 17, no. 1, 2017, pp. 407-413.