ETRI

2017
Electronics and
Telecommunications
Trends

4차 산업혁명 선도를 위한
ICT소재부품기술 특집

Ⅰ. 서론
Ⅱ. 기술개요
Ⅲ. 기술동향
Ⅳ. 현재이슈
Ⅴ. ETRI 기술
Ⅵ. 결론

4차 산업혁명을 선도할 메타물질 완전흡수체 기술 동향

Metamaterial Perfect Absorber Technology for Leading the Fourth Industrial Revolution

홍성훈 (S.H. Hong, shong@etri.re.kr) ICT 소재연구그룹 선임연구원
김미현 (M.H. Kim, kmhyun@etri.re.kr) ICT 소재연구그룹 연구원
윤혜원 (H.W. Yun, yhw60203@etri.re.kr) ICT 소재연구그룹 위촉연구원

A metamaterial is a material engineered to have a property that does not exist in nature. A designable material property can be achieved by tailoring its structure, and thus a metamaterial is a novel ICT material and component technology that can break through the limitations of conventional technologies. Among the metamaterials available, a perfect metamaterial absorber is a technology that can nearly absorb light, sound waves, thermal waves, and electromagnetic waves with a simple structure, and has been of significant interest in energy, display, sensor, stealth, and military applications, with wavelengths from visible light to microwaves. In this article, we introduce a brief description of metamaterial absorber technology, the critical issues for its application, as well as ETRI's developed metamaterial absorber technology and its prospects for future use.

* DOI: 10.22648/ETRI.2017.J.320601
* 본 연구는 과학기술정보통신부의 글로벌프론티어 사업 및 미래융합파이오니어 사업의 지원을 받아 수행하였음.

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

Ⅰ. 서론

최근, 사물인터넷(IoT), 5G, 웨어러블 기기(Wearable device) 등 첨단 ICT 기술의 급격한 발전에 따라 첨단 부품에 대한 기술 수요가 급증하게 되고, 이에 한계에 봉착한 기존 소재의 물성을 획기적으로 뛰어넘는 새로운 소재나 구조에 대한 관심이 높아지고 있다. 이 중 투명망토(Cloaking), 음굴절(Negative refraction), 슈퍼렌즈(Superlens)로 알려진 메타물질(Metamaterials)은 자연계에 존재하지 않는 물성을 가지는 가공된 인공적 물질로, 그 구조, 형상, 배열을 조절하여 물질의 특성을 원하는 대로 구현할 수 있게 되고, 이를 이용하여 기존 부품의 특성을 획기적으로 향상시킬 수 있게 된다[1]. 메타물질은 전자파, 통신, 운송, 위성, 국방 등의 다양한 산업에 활용이 가능하여 매우 파급효과가 크고, 이에 세계 메타물질 전체 응용시장 규모는 2020년 10억 달러, 연평균 27.1%로 급격하게 성장할 것으로 예상된다[2].

메타물질의 종류는 동작 파장 및 그 기능에 따라 다양하게 정의할 수 있지만, 본고에서는 메타물질 완전흡수체(Metamaterials perfect absorber)에 주안점을 맞추어서 서술하고자 한다.

메타물질 완전흡수체 기술은 빛이나 음파, 복사열, 전자파를 선택적 파장 영역에서 완전히 흡수할 수 있는 기술로, 2008년 Landy 교수에 의해 최초로 제안된 이후로 Thermal emitter, Energy harvesting, Sensors and spatial light modulators(SLM) 등의 응용에 많은 잠재력을 가지고 다양한 ICT 응용에 연구가 되어 왔다[3]. 이러한 메타물질 완전흡수체는 구조나 소재를 바꿔 선택적 파장 영역을 원하는 만큼 완전히 흡수할 수 있기 때문에 많은 관심을 받고 있고, 기존 기술 보다 소형화, 경량화, 박막화 등이 가능하기 때문에 다양한 산업 및 군수 분야 등에서 많은 응용이 가능하다[(그림 1) 참조].

예를 들어 군용 스텔스 기술의 경우, 메타물질 완전흡수체를 적용하게 되면, 기존 소재를 사용하는 것에 비해 훨씬 더 얇고 가볍게 제작할 수 있기 때문에 다양한 군용 이동체의 레이더 피탐용 등으로 적용이 가능하다. 예를 들어 전투기 또는 레이저 유도 미사일 등에 사용되는 적외선 파장의 빛에 대해 메타물질 완전흡수체를 이용하여 입사되는 빛을 거의 흡수해 레이더에 감지되지 않게 할 수 있다. 또한, 메타물질 완전흡수체의 경우, 외부 신호에 의해 능동적으로 실시간 특성 조절이 가능하기 때문에 군용 이동체의 능동 위장 기술에 적용이 가능하다.

(그림 1) 메타물질 완전흡수체 기술 활용분야

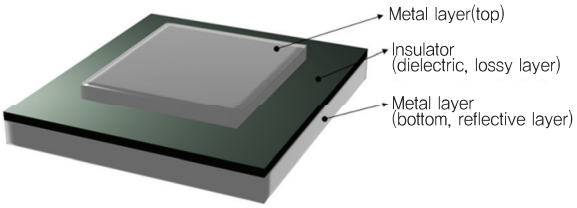
메타물질 완전흡수체 기술의 산업 응용으로는 고효율 태양광, 태양열 발전 에너지 분야, 초고속, 저전력 차세대 광통신/광소자 분야, 고민감 차세대 센서 분야, 고해상도 차세대 홀로그램/디스플레이 분야 등이 있으며, 이외에도 기존 소재나 소자를 소형화, 박형화시켜 고효율 초박형 유연 태양전지, 웨어러블 헬스케어용 초소형 안테나, 웨어러블 열전소자 등 다양한 첨단 웨어러블 ICT 디바이스등에도 응용 가능하다.

이러한 메타물질 원천 기술을 확보하기 위해 전 세계적으로 많은 연구가 진행되고 있으며, 해외에서는 미국 하버드대학, MIT, 버클리, 유펜대학교, 영국 Southampton 대학, 독일 막스플랑크 연구소, 중국 광치연구소, 일본 RIKEN 연구소 등을 중심으로, 국내에서는 서울대, 고려대, 한국과학기술원, 연세대, 이화여대 등 학

계와 한국전자통신연구원, 한국기계연구원 등 연구소를 중심으로 메타물질에 대한 원천 연구가 활발히 이루어지고 있다.

II. 기술개요

메타물질 완전흡수체 기술은 구조나 소재 등을 조절하여 선택적 파장 영역에서 빛이나 전자기파를 완전히 흡수할 수 있는 기술로, 일반적으로 (그림 2)와 같은 구조로 이루어진다. 즉, 그림에서 보는 바와 같이 두 층의 금속층과 그 사이에 있는 유전체층으로 이루어진 금속/유전체/금속(MIM: Metal-Insulator-Metal)구조를 가지고 있고, 그 동작 메커니즘은 맨 위층의 금속층은 패턴이 형성되어 안테나처럼 선택적인 파장영역에서 입사되는 전자기파나 빛을 우선 흡수하게 되며, 흡수된 전자기파는 맨 아래층의 금속층과 강한 전자기적 커플링을 형성하여 두 금속층과 유전층 영역에 완전히 가둬지게 된다. 이때, 대부분의 흡수된 전자기파 에너지는 금속층, 유전층의 손실 부분에 의해 열 등으로 바뀌어 사라지게 된다. 이러한 메타물질 완전흡수체의 형상, 유전체 두께, 소재 등을 조절하여 원하는 파장 영역에서 입사파를 완전히 흡수할 수 있게 된다.



(그림 2) 메타물질 완전흡수체 구조 모식도

III. 기술동향

메타물질 완전흡수체에 대한 연구는 현재 기초연구로 설계, 제조, 소재 기술 등에 대해 활발히 진행되어 왔으며, 이제 이를 이용한 응용/실용 연구에 대해 많은 관심이 진행되는 단계이다. 메타물질 완전흡수체를 ICT에 응용하는 연구는 그 적용 파장 영역에 따라 크게 마이크로파, 테라헤르츠(THz: Terahertz), 적외선, 근적외선/가시광 파장 영역 분야 등으로 나눌 수 있다.

마이크로파 메타물질 완전흡수체는 주로 스텔스, 전자파 저감, 센서 등에 응용하는 연구가 보고되고 있다. 우선 메타물질 완전흡수체를 이용하여 기존 마이크로파 흡수체보다 훨씬 얇은 두께($4/\lambda$이하)로 마이크로파 흡수체를 구현한 결과가 보고되었다[4]. 이러한 연구는 실제 환경의 스텔스 응용을 위해 입사각, 편파에 둔감한 광대역 또는 다중대역 메타물질 완전흡수체 구현에 초점이 맞춰 연구가 진행되고 있다. 또한, 마이크로파 메타물질 완전흡수체를 센서에 적용하는 연구도 진행되고 있고, 이는 미세유체기술과 접목하여 실시간으로 액체의 농도 등의 변화를 빠르게 감지할 수 있어 이를 이용하여 실시간으로 위험 감지 등이 가능한 화학 센서 등에 응용할 수 있다[5].

테라헤르츠 메타물질 완전흡수체는 0.1~10THz 대역에서 동작하는 메타물질로서 향후 기대가 되는 미래응용기술로 초고속 무선통신, 테라헤르츠 이미징, 테라헤르츠 능동 광 스위치 및 광 변조기, 보안 감지, 열 방출기 등 다양한 분야에서 적용이 가능하다.

메타물질 완전흡수체의 적외선 응용으로는 적외선 탐지기, 고성능 센서, 파장선택적 열 방출기, 적외선 스텔스, 열화상 이미징 등이 있다. 적외선 스텔스 기술로 주기적인 메타물질 완전흡수체를 이용하여 첨단 무기 등에 사용되는 적외선 탐지 기술을 향상시킨 결과와 적외선 파장영역에서 광대역 메타물질 완전흡수체를 이용하여 열화상카메라 등에 적용되는 비냉각식 마이크로 볼로미터의 성능을 향상시킨 결과 등이 보고되었다[6], [7]. 또한, 근적외선 응용방향으로 메타물질 완전흡수체를 이용하여 광통신 부품을 소형화, 집적화하여, 이를 통한 초고속, 저전력 차세대 광통신/광소자 등에 적용하는 분야는 매우 시장성이 높다고 할 수 있으며, 이외에도 고민감 근적외선 생체센서, 고성능 광검출기 등에

활용이 가능하다.

마지막으로 가시광 파장 메타물질 완전흡수체 응용이 있으며, 이 분야는 높은 효율, 광대역, 높은 흡수율이 필요한 태양에너지 발전, 홀로그램등 고해상도 차세대 디스플레이, 광센서 등이 있다. 최근, 가시광 파장 영역에서 동작하는 수십 나노 이하의 메타물질 완전흡수체를 이용하여 태양전지, 광전극, 태양열광전지(STPV: Solar-Thermophotovoltaic) 등의 성능을 향상시킨 결과가 보고되었고, 열전소자와 접목하여 고민감 광센서 응용 또한 매우 흥미로운 분야라 할 수 있다[8], [9]. 디스플레이 분야에서는 메타물질 완전흡수체를 이용하여 빛의 위상 및 진폭을 마음대로 조절하여 고해상도 홀로그램(Hologram) 픽셀, 초소형 광변조기(SLM: Spatial Light Modulator)를 구현하는 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 향후 능동 소자와 접목하여 디스플레이 기술을 획기적으로 발전시킬 것으로 예상된다.

Ⅳ. 현재이슈

메타물질 완전흡수체 기술의 현재 이슈로는 메타물질 완전흡수체의 대역폭 개선 이슈, 능동 메타물질 완전흡수체 개발에 대한 이슈, 메타물질 완전흡수체 제조 기술 및 신소재에 대한 이슈 등이 있다.

우선 대역폭 이슈로는 아직까지 메타물질 완전흡수체의 적용 밴드 영역(Operation band width)이 좁고, 제한되어 있다는 점이다. 특히, 태양에너지 발전, 반사형 디스플레이 등에 적용하기 위해서는 기존에 비해 넓은 적용 대역폭과 높은 흡수율이 필수적이라고 할 수 있다. 이러한 대역폭을 개선하기 위해 여러 다른 흡수 대역을 가지는 메타물질 완전흡수체를 집적하거나, 점진적인 다층적층 구조 등이 구조적 접근 방법과 새로운 메타소재, 즉, 손실이 큰 금속 또는 유전 소재 등을 적용하여 대역폭을 넓히는 연구가 진행되고 있다. 또한, 대역폭 개선과 함께 실제 응용에서는 입사파가 다양한 각도와 편광 방향을 가지고 입사하고, 메타물질 완전흡수체가 자유곡면 등에도 적용될 필요가 있기 때문에 메타물질 완전흡수체의 입사파의 각도 및 편광 방향에 따른 둔감성도 매우 필요한 기술이다.

두 번째로 능동 메타물질 완전흡수체 개발에 대한 이슈로 외부신호에 따라 특성 조절이 가능한 능동형 메타물질 완전흡수체 기술을 말한다. 이러한 외부신호로는 광신호, 전기적 신호, 열적 신호, 기계적 신호등이 있을 수 있으며, 이러한 외부 신호에 의해 동작파장, 대역폭, 흡수율 등을 능동적으로 필요한 만큼 조절할 수 있는 기술이 필요하다. 이러한 메타물질 완전흡수체에 외부신호에 따라 특성이 변화되는 상변화 소재($Ge_2Sb_2Te_5$, Bi_2Se_3, VO_2 등), 액정 소재(Liquid Crystal) 등을 적용하여 디스플레이나 센서소자에 적용 가능한 능동 메타물질 완전흡수체를 개발하는 연구가 활발히 진행되고 있다[10], [11]. 디스플레이, 홀로그램, 광소자 등 메타물질을 이용한 광부품의 경우, 실제 시장에 적용하기 위해서 능동 기술 개발이 매우 중요하다고 할 수 있다.

세 번째로 메타물질 완전흡수체 제조 기술 및 신소재에 대한 이슈가 있다. 우선, 제조기술의 경우 메타물질은 일반적으로 동작파장의 $\lambda/5$ 이하 크기를 가지기 때문에, 근적외선이나 가시광 파장용 메타물질의 경우, 수십에서 수백 나노 이하 크기의 패턴이 필요하게 된다. 이러한 나노패턴을 제조하는 데는 일반적으로 전자빔 리소그래피와 같은 고비용의 리소그래피 공정이 필요하기 때문에 대면적에 저비용으로 메타물질 완전흡수체를 제조할 수 있는 나노임프린팅 등의 나노공정 기술 개발이 매우 중요하게 된다. 또한, 이러한 메타물질 완전흡수체는 형상 및 구조에 따라 다양한 전자기적 특성을 구현할 수 있고, 이에 펨토초 레이저 기술 같은 기존 2차원 구조를 뛰어넘는 3차원 구조를 쉽게 제작할 수 기술이 필요하게 되고, 그 외에도 웨어러블 디바이스 등에 메타물질 완전흡수체를 적용하기 위해서는 트랜스퍼 공정 등을 통하여 유연기판이나 스트레쳐블 기판 위에 제

조하는 기술도 매우 중요하다고 할 수 있다[12], [13].

마지막으로 새로운 메타물질 소재에 대한 개발이 필요하다. 기존에는 메타물질 완전흡수체의 금속 소재로 금, 은, 구리, 니켈 등이 많이 사용되었다. 하지만, 이러한 소재의 경우, 소재 선택의 폭이 넓지 않고, 큰 손실과 같은 문제점이 있어서 원하는 특성을 구현하기 어렵다. 그러므로 다양한 응용에 맞는 소재가 필요하기 때문에 새로운 메타물질 소재에 대한 연구가 필요하다[14].

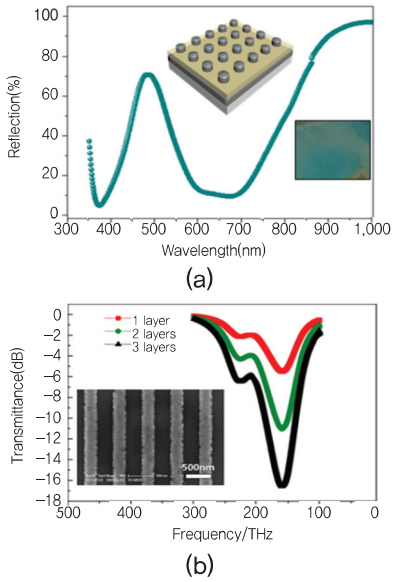
우선 저손실 메타물질 소재로 투명 전도성 산화물 소재(TCO: Transparent Conductive Oxide), 도핑된 반도체 소재(Doped semiconductor)가 연구되고 있고, 이를 이용하여 적외선 파장 영역에서 광필터, 광회로 등이 개발되고 있다[15].

그래핀 소재(Graphene)는 높은 투명성, 유연성, 전도성 및 외부신호에 따른 가변성을 가지고 있어, 테라헤르츠 파장 영역에서 유연 메타물질 소재로 적용이 가능하다. 나노결정(Nanocrystal) 소재는 대면적 용액 공정이 가능하고 메타물질 공정 가격을 크게 낮출 수 있을 뿐만 아니라 나노결정 소재의 형상, 조성, 커플링 정도에 따라 다양한 특성 조절이 가능하기 때문에 기존 메타물질 소재를 대체할 수 있는 가능성을 보인다[16]-[19].

반도체 소자에 응용을 위해서는 CMOS(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) 공정에 적용가능한 소재를 사용하는 것이 중요하다. 은, 금, 구리 등은 반도체 공정에 적용하기 어렵기 때문에, TiN, Al과 같은 기존 반도체 소재를 활용해야 하고, 응용분야에 따라 내구성 및 내열성을 가지는 메타물질 완전흡수체 소재 개발이 필요하다. 태양열 발전에 적용되기 위해서는 높은 온도에서도 안정적으로 동작할 수 있는 W, Mo, TiN 등의 내열소재가 필요하다[20].

V. ETRI 기술

ETRI에서는 앞서 이야기한 메타물질 완전흡수체의 기술적 난제인 대역폭 개선, 메타물질 신소재 및 신공정 개발 및 능동 메타물질 등에 대하여 연구를 진행하고 있다. 대역폭 개선으로는 가시광 및 근적외선 파장 영역에서 기존에 비해 수~수십 배 이상의 넓은 대역폭을 가지는 메타물질 완전흡수체를 구현하였다. 이는 통상적인 증착기반 금속 소재가 아닌 유전특성을 조절할 수 있는 나노결정 기반 신소재를 이용하여 제작하는 방식으로, 메타물질 완전흡수체의 대역폭을 필요한 만큼, 필요한 구간만 증가시킬 수 있는 원천 기술이다.



(그림 3) ETRI 메타물질 완전흡수체 기술

(그림 3)은 ETRI에서 개발한 가시광 파장용 광대역 완전흡수체이며, 나노결정 소재를 이용하여 대역폭을 크게 향상시킨 연구결과이다.

이러한 가시광 메타물질 완전흡수체는 광대역임에도 불구하고, 파장에 따른 흡수율의 차이가 매우 커서 높은 반사율과 높은 색순도를 가지는 고해상도 픽셀을 구현하였고, 이를 적용한 반사형 디스플레이 구현가능할 것으로 예상된다. 이러한 메타물질 완전흡수체 기술은 고해상도 홀로그래피, 광변조기 기술 등에도 적용이 가능한 기술이다. 또한, 가시광 파장뿐만 아니라 근적외선 파장영역까지 넓은 흡수 대역을 가질 수 있어, 메타물질

완전흡수체를 적용하였을 때, 태양에너지 소자 및 광전극(Photoanode)의 효율을 크게 향상시킬 수 있다.

또 하나의 기술적 난제인 능동 메타물질에 대한 연구로 메타물질 완전흡수체에 온도에 따른 상변화소재인 열변색소재를 접목하여 가시광 파장영역에서 열신호에 의해 능동적으로 특성을 조절할 수 있는 메타물질 완전흡수체를 구현하였다.

ETRI 전자파 메타물질은 신소재 기반 인쇄 공정을 이용하여 유연기판 위에 제작하고 있으며, 기존 소재에 비해 저온에서 고전도성을 띨 수 있는 소재를 개발하여, 메타물질 완전흡수체 기반의 웨어러블 디바이스에 적용할 수 있는 초소형 인쇄형 안테나, 초박형 전자파 흡수/차폐 기술 등을 개발하고 있다. 공정온도는 200도 이하의 저온공정에서 기존 보다 1/10배 이하의 두께에서 동작하는 전자파 메타물질을 개발하고 있다.

또한, 근적외선 파장영역에서 동작하는 저손실 소재 및 신공정에 대한 연구로, 투명전도성 산화물 소재 및 공정에 대한 기술을 개발하였으며, 근적외선 파장 영역에서 16dB 이상의 높은 차폐 특성을 확보하였다.

이러한 ETRI 메타물질 완전흡수체 기술은 기존 메타물질 완전흡수체 기술에 비해 우수한 대역특성, 능동성 및 조절가능한 메타소재 등을 가지고 있어, 다양한 응용분야에 적용이 예상되며, 특히 차세대 광소자, 디스플레이 소자 원천 기술로 본 기술은 적용될 수 있다.

Ⅵ. 결론

메타물질 완전흡수체 기술은 원하는 파장영역에서 흡수 특성을 마음대로 조절할 수 있는 기술로 기존 소재나 부품을 소형화, 박막화시킬 수 있으며, 성능을 크게 향상시킬 수 있는 원천 기술이다. 메타물질의 크기에 따라 가시광 파장부터 마이크로파 파장영역까지 에너지, 디스플레이, 광통신등 다양한 응용분야에서 활용될 수 있는 핵심 기술로 전 세계적으로 메타물질 기술의 원천 기술을 확보하고자 치열한 개발 경쟁을 벌이고 있다.

ETRI에서 연구·개발되어 확보한 광대역 메타물질 완전흡수체 기술은, 메타물질 소재부터 엔지니어링하여 메타물질 흡수체의 특성을 새롭게 디자인하고, 그 영역을 확장시킬 수 있는 기술로, 기존의 협대역 이슈, 유연화 이슈, 고비용 이슈를 동시에 해결함으로써 메타물질 완전흡수체의 실용화를 앞당길 수 있는 핵심 기술이다. 이를 통하여 고효율 태양에너지 발전 기술, 고성능 가시광 광전극 기술, 고해상도 디스플레이 기술 등의 광범위한 산업에 폭넓게 적용가능할 것으로 예상되며, 향후 이 기술이 사물인터넷, 웨어러블 기술 발전에 크게 기여할 것으로 예상된다.

ETRI에서 연구·개발된 다양한 메타물질 기술은 앞으로 광통신 기술에 적용될 경우, 초고속 저전력 차세대 광통신/광소자 등에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 메타물질을 통하여 기존 광, 전자 부품의 기술적 한계를 극복하고, 소형화, 고속화 기술등을 확보하여, 빠른 속도로 성장하고 있는 첨단 광소자 및 광부품 시장 활성화에 크게 이바지할 수 있을 것으로 기대한다.

약어 정리

CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
EM	Electromagnetic
LC	Liquid Crystal
Lidar	Light Detection and Ranging
MIM	Metal-Insulator-Metal
PV	Photovoltaic
SLM	Spatial Light Modulator
STPV	Solar-Thermophotovoltaic
TCO	Transparent Conductive Oxide
THz	Terahertz

참고문헌

[1] D.R. Smith, J.B. Pendry, and M.C.K. Wiltshire, “Metamaterials and Negative Refractive Index,” *Sci.*, vol. 305, no. 5685, Aug. 2002, pp. 788–792.

[2] BCC Research: Market Research Reports & Industry Analysis, 2016.

[3] N.I. Landy et al., "Perfect Metamaterial Absorber," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 100, May 2008, pp. 1–4.

[4] D. Lee et al., "Incident Angle- and Polarization- Insensitive Metamaterial Absorber Using Circular Sectors," *Sci. Rep.*, vol. 6, 2016, pp. 27155:1-27155:8.

[5] M. Yoo, H.K. Kim, and S. Lim, "Electromagnetic-Based Ethanol Chemical Sensor Using Metamaterial Absorber," *Sens Actuators B Chem.*, vol. 222, Jan. 2016, pp. 173–180.

[6] J.Y. Jung et al., "Infrared Broadband Metasurface Absorber for Reducing the Thermal Mass of a Microbolometer," *Sci. Rep.*, vol. 7, Mar. 2017, pp. 430:1-430:8.

[7] J. Kim, K. Han, and J.W. Hahn, "Selective Dual-Band Metamaterial Perfect Absorber for Infrared Stealth Technology," *Sci. Rep.*, vol. 7, July 2017, pp. 6740:1-6740:9.

[8] J. Park et al., "Two-Dimensional Metal-Dielectric Hybrid-Structured Film with Titanium Oxide for Enhanced Visible Light Absorption and Photo Catalytic Application," *Nano Energy*, vol. 21, 2016, pp. 115-122.

[9] S. Han et al., "Broadband Solar Thermal Absorber Based on Optical Metamaterials for High-Temperature Applications," *Adv. Opt. Mater.*, vol. 4, no. 8, Aug. 2016, pp. 1265–1273.

[10] T. Cao et al., "Broadband Polarization-Independent Perfect Absorber Using a Pahse Change Metamaterial at Visible Frequencies," *Sci. Rep.*, vol. 4, 2014, pp. 3955:1-3955:8.

[11] S. Savo, D. Shrekenhamer, and W.J. Padilla, "Liquid Crystal Metamaterial Absorber Spatial Light Modulator for THz Applications," *Adv. Opt. Mater.*, vol. 2, no. 3, 2014, pp. 275-279.

[12] I. Faniayeu and V. Mizeikis, "Vertical Split-Ring Resonator Perfect Absorber Metamaterial for IR Frequency Realized via Femtosecond Direct Laser Writing," *Appl. Phys. Exp.*, vol. 10, no. 6, May 2017, pp. 0622001:1-0622001:5.

[13] M. Choi et al., "Stretchable Active Matrix Inorganic Light-Emitting Diode Display Enabled by Overlay-Aligned Roll-Transfer Printing," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 27, no. 11, Mar. 2017, pp. 1606005:1-1606005:10.

[14] G.V. Naik, V.M. Shalaev, and A. Boltasseva, "Alternative Plasmonic Materials: Beyond Gold and Silver," *Adv. Mater.*, vol. 25, no. 24, 2013, pp. 3264-3294.

[15] H. Caglayan et al., "Near-Infrared Metatronic Nanocircuits by Design," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 111, 2013, pp. 073904:1-073904:5.

[16] 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.

[17] A.T. Fafarman et al., "Air-Stable, Nanostructured Electronic and Plasmonic Materials from Solution-Processable, Silver Nanocrystal Building Blocks," *ACS Nano*, vol. 8, no. 3, 2014, pp. 2746-2754.

[18] T. Paik et al., "Hierarchical Materials Design by Pattern Transfer Printing of Self Assembled Binary Nanocrystal Superlattices," *Nano Lett.*, vol. 17, no. 3, 2017, pp. 1387-1394.

[19] T. Paik et al., "Solution-Processed Phase-Change VO_2 Metamaterials from Colloidal Vanadium Oxide(VOx) Nanocrystals," *ACS Nano*, vol. 8, no. 1, 2014, pp. 797-806.

[20] W. Li et al., "Refractory Plasmonics with Titanium Nitride: Broadband Metamaterial Absorber," *Adv. Mater.*, vol. 26, no. 47, 2014, pp. 7959-7965.