

디스플레이를 위한 가시광 메타물질 기술 동향

Visible Metamaterials Research Trends for Display Applications

홍성훈 (S.H. Hong, shong@etri.re.kr) 스마트소재연구소 책임연구원
김수정 (S.J. Kim, kimsj526@etri.re.kr) 스마트소재연구소 박사후연구원
유의상 (E.S. Yu, yues1130@etri.re.kr) 차세대반도체연구소 선임연구원
조현수 (H. Cho, hyunsucho@etri.re.kr) 실감디스플레이연구소 선임연구원
김용해 (Y.H. Kim, yhakim@etri.re.kr) 실감디스플레이연구소 책임연구원
황치선 (C.S. Hwang, hwang-cs@etri.re.kr) 실감디스플레이연구소 책임연구원

ABSTRACT

Visible metamaterials offer a powerful platform for manipulating the phase, amplitude, and polarization of light in the visible spectrum. By engineering them in subwavelength-scale nanostructures, these materials enable precise control over light propagation, making them a cornerstone technology for advanced applications, such as augmented-reality and virtual-reality displays. Several key technological advancements are required for the successful integration of visible-light metamaterials into display technologies. These include the development of high-index, low-loss metasurface materials, high-resolution, high-precision large-area nanopatterning capabilities, and optimized metasurface design techniques. In this article, we present a recent research trend in visible-metamaterial technology, the issues for its display application, and ETRI's research.

KEYWORDS Display, Metamaterial, Metasurface, 디스플레이, 메타물질, 메타표면

1. 서론

최근 가상현실(VR), 증강현실(AR), 메타버스(Metaverse) 등 새로운 기술의 발전에 따라 고해상도 디스플레이 등 첨단 부품에 대한 기술 수요가 크게 급증하고 있으며, 이에 한계에 봉착한 기존 소재의 물성을 획기적으로 뛰어넘는 새로운 소재나 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 이 중 메타물질(Meta-

materials)은 자연계에 존재하지 않는 특이한 물성을 구현할 수 있는 가공된 인공적 물질로, 그 구조, 형상, 배열 등을 조절하여 물질의 특성을 원하는 대로 구현할 수 있게 되고, 이를 이용하여 기존 부품의 특성을 획기적으로 향상시킬 수 있어 많은 관심을 받고 있다[1].

메타물질은 디스플레이, 통신, 모빌리티, 바이오, 에너지, 국방 등 다양한 산업에 활용이 가능하여 매

* DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2024.J.390603>

* 본 연구는 과학기술정보통신부의 나노 및 소재 기술 개발 사업(RS-2024-00408286, RS-2021-NR057360)의 지원을 받아 수행하였음.

우 파급효과가 크고, 이에 세계 메타물질 전체 응용 시장 규모는 2028년 70억 달러, 연평균 26.8%로 급격하게 성장할 것으로 예상된다[2]. 메타물질의 종류는 동작 파장 및 그 기능에 따라 다양하게 정의할 수 있지만, 본고에서는 디스플레이에 활용 가능한 가시광 유전체 메타물질(Visible Dielectric Metamaterials)에 주안점을 맞추어서 서술하고자 한다.

가시광 메타물질은 주기적인 서브파장 크기의 나노구조로 구성된 인공 구조물로 가시광파장 대역인 400~700nm 파장 대역에서 그 구조에 따라 빛의 위상, 진폭, 편광 등을 자유롭게 제어할 수 있다. 특히, 2차원 평면 구조인 메타표면(Metasurface)은 초박형 구조에서 입사광의 변조가 자유롭게 가능하며 기존의 부피가 큰 광학 장치를 더 얇고 가볍게 대체할 수 있게 되고, 이러한 특성으로 인해 디스플레이에서 홀로그래피, 고해상도 컬러픽셀, 초박형 렌즈, 증강 현실 장치 등에서 차세대 디스플레이 소재 및 부품 기술로 활발하게 연구되고 있다.

예를 들어, 메타렌즈(Metalens)는 위상 등이 정교하게 조절된 메타표면의 공간 배열을 통하여 빛의 진행 방향을 조절함으로써 초박형 평면 구조에서도 빛을 굴절시키고 초점을 맞출 수 있게 되어 광학 부품의 크기를 크게 줄일 수 있게 된다. 또한, 메타표면 컬러필터(Metasurface Color Filter)는 메타구조를 통하여 선택적 파장 대역만 반사시켜 선명한 고해상도 색상을 구현할 수 있게 되며, 메타 홀로그램(Meta-Hologram)은 서브파장 크기의 나노구조로 위상 또는 진폭 정보를 조절 가능하여 매우 넓은 시야각(FoV)이 가능하게 되고, 복소 변조가 가능하여 정보 손실 없이 높은 품질의 3D 홀로그램이 가능하게 된다.

이러한 가시광 메타물질 원천 기술을 확보하기 위해 전 세계적으로 많은 연구가 진행되고 있으며, 해외에서는 미국 하버드대학교, 스탠퍼드대학교,

매사추세츠대학교, 미국 국립표준기술연구소, 싱가포르 A*STAR 연구소, 영국 사우스햄튼대학교, 캠브리지대학교, 독일 막스플랑크연구소, 중국 화중과학기술대학교, 중산대학, 중국과학원, 일본 도쿄농공대학, 일본 산업기술종합연구소, NTT 연구소 등을 중심으로, 국내에서는 포항공과대학교, 고려대학교, 한국과학기술원, 광운대학교, 경북대학교, 한국전자통신연구원, 한국기계연구원, 삼성종합기술원 등을 중심으로 가시광 메타물질에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

II. 기술 동향

가시광 메타물질은 가시광파장 대역에서 나노구조에 따라 위상, 진폭, 편광 등을 자유롭게 제어할 수 있는 기술로 형상, 소재 등에 따라 물성 등을 조절할 수 있어 서브파장 크기의 나노구조의 설계 및 제조 기술, 소재 기술 등이 매우 중요하게 된다. 이에 가시광 메타물질 기술 동향을 다음과 같이 소재 기술, 설계 기술, 제조 기술로 나누어 정리하였다.

1. 가시광 메타물질 소재 기술 동향

가시광 메타물질은 크게 금속 소재를 이용한 플라즈모닉 기술과 유전체 소재를 이용한 Mie 공명 기술로 나눌 수 있다. 이 중 유전체 메타물질은 가시광 대역에서 손실이 훨씬 작아 디스플레이 분야에서 활발히 연구되고 있다. 유전체 메타물질에서 Mie 공명 기술은 나노구조의 크기, 형태, 굴절률 등에 다양한 요소에 따라 조절되며 효율적인 나노안테나 구현을 위해서는 낮은 광학 손실과 높은 굴절률을 가지며 나노공정이 용이한 유전체 소재가 중요하게 된다.

높은 굴절률을 가지는 유전체 소재인 실리콘(Si),

실리콘 질화물(SiN_x), 이산화티타늄(TiO₂), 오산화탄탈륨(Ta₂O₅), 산화지르코늄(ZrO₂), 산화하프늄(HfO₂), 질화갈륨(GaN) 등이 주로 연구되어 왔다[3,4].

실리콘 소재 및 실리콘 질화물 소재는 반도체 공정으로 제조가 용이하고 굴절률이 높아 메타물질 소재로 많이 연구되어 왔다. 최근 연구 방향으로 실리콘 소재는 530nm 이하의 가시광 대역에서 높은 굴절률 및 낮은 손실을 확보하기 위하여 플라즈마 화학기상 증착 공정을 조절하여 비정질 실리콘의 손실을 크게 낮추고, 이를 이용하여 컬러필터를 구현한 연구가 보고되었다[5]. 또한 실리콘 질화물 소재의 경우, 플라즈마 화학기상 증착 공정을 조절하여 실리콘 조성을 증가시켜 실리콘 질화물(SRN: Silicon Rich Nitride)의 굴절률을 높여 메타표면의 성능을 개선한 연구가 보고되었다[6]. 반도체 공정이 용이하다는 큰 장점이 있어 이러한 실리콘 계열 소재는 디스플레이 산업에 빠르게 적용될 수 있을 것으로 예상된다.

산화물 메타물질 소재로는 대표적으로 이산화티타늄(TiO₂), 산화지르코늄(ZrO₂), 산화하프늄(HfO₂) 등이 있고, 이산화티타늄(TiO₂)은 굴절률이 2.5 이상으로 높고 매우 낮은 유전손실 특성이 있어 가시광 메타물질 소재로 많은 연구가 진행되어 왔다[7]. 산화지르코늄도 굴절률(~2.2)이 높고, 낮은 유전손실 및 높은 안정성 특성이 있어 자외선 및 가시광 대역 홀로그래픽 메타표면에 매우 적합한 소재이다[8]. 또한, 산화하프늄(HfO₂)은 자외선 대역에서 투명하며 높은 굴절률(~2.1)을 가져 자외선 및 가시광 메타표면 소재로 관심을 받고 있다[9]. 하지만 이산화티타늄(TiO₂), 산화지르코늄(ZrO₂), 산화하프늄(HfO₂) 등은 공정성이 좋지 않아 고종횡비 메타패턴 제조에 있어 원자층 증착 공정(ALD: Atomic Layer Deposition) 기반 공정이 필요하여 공정 비용이 높고 제조에 어려움이 있다.

최근 이러한 산화물 메타물질 소재의 공정성을 확보하기 위해 나노임프린트 공정으로 고종횡비 메타표면 형성이 가능한 산화물 나노입자가 분산된 고굴절률 레진 소재에 대한 연구도 활발히 진행되고 있고, 대면적 메타물질 제조가 용이하여 메타렌즈, 홀로그램 등 다양한 분야에 활용될 것으로 예상된다[10-12].

가시광 및 자외선 파장 대역에서 높은 굴절률(~2.1), 낮은 유전손실 및 우수한 공정성을 가지는 오산화탄탈륨(Ta₂O₅) 소재도 보고되었고, 이를 이용하여 고종횡비 메타표면 제조가 가능하여 메타렌즈, 고선명 컬러픽셀, 홀로그램 등에 새로운 소재로 활용될 것으로 판단된다[13].

2. 가시광 메타물질 설계 기술 동향

최근의 다양한 최적화 알고리즘과 머신러닝 기법의 발달은 나노광학 분야에서 역설계 기법을 발전시켰다. 설계자의 경험과 직관에 기반하는 전통적인 설계와는 달리, 목표로 하는 특정한 광학적 특성을 정의하고 이를 구현하기 위한 나노 광학 구조체를 최적화하는 계산 기법으로 매우 복잡하고 혁신적인 광학적 특성을 구현할 수 있다. 광학 역설계 기법으로는 Adjoint Optimization 기법, 머신러닝 기법, 입자 군집 최적화(PSO: Particle Swarm Optimization) 등의 방법이 활용되어 다양한 메타물질 응용의 설계에 활용되고 있다. ETRI에서는 이중 Adjoint Optimization에 기반한 역설계 기법을 확립해 메타물질의 설계에 활용하고 있으며 디스플레이 메타물질로의 활용 가능성을 모색 중이다[14].

PSO 기법은 복잡한 다차원 공간에서의 전역 최적화(Global Optimization) 문제를 해결하기 위한 최적화 알고리즘으로 제안되었다. 이 기법에서 입자(Particle)는 최적화 문제에 대한 잠재적인 해를 의미

하고 다차원의 공간에서 다수의 입자가 군집을 이루어 목표함수를 최적화하는 방향으로 이동한다. 이때, 입자가 탐색 공간에서 이동해 나아갈 방향과 이동 크기를 의미하는 속도는 입자 개인의 경험과 군집 내의 다른 입자들의 경험을 반영하여 업데이트 되어 최적해에 가까워지도록 탐색 경로를 조정해 나간다. 이 기법은 다차원 변수 값을 갖는 메타물질에서 설계변수 최적화를 통해 목표함수를 달성하고자 할 때 적합한 것으로 알려져 있으며, 최근 메타물질 기반의 센서 등의 설계 최적화에 활용되고 있다[15].

그 중에서 특히, Adjoint Optimization 기법은 나노 광학 분야에서 위상최적화를 위해 가장 많이 활용이 되고 있는 역설계 기법이다. Adjoint Optimization 기법의 광학 역설계는 로렌츠 상반정리(Lorentz Reciprocity)의 원리에 기반해 시뮬레이션의 횟수를 극적으로 줄일 수 있는 알고리즘이다[16]. 먼저 모든 메쉬 노드에서 작은 영역(ΔV)의 물성 변화($\Delta \epsilon$)에 따른 목적함수의 변화를 확인해 최적의 지점을 찾을 수 있다. 이 과정은 직접적인 Brute Force 방법으

로 메쉬 노드의 숫자가 N 개인 경우, $(N + 1)$ 번의 시뮬레이션 수행을 필요로 한다. 이때, 작은 영역에서의 $\Delta \epsilon$ 변화가 충분히 작은 경우 상응하는 전기 쌍극자로 근사될 수 있다. 최종적으로 Source와 Monitor의 위치가 서로 바뀌어도 전자기적인 반응은 동일하다는 로렌츠 상반정리의 원칙에 의해 전기 쌍극자를 Monitor에 위치시킨 후 각 메쉬 노드에서 광학적 반응을 Monitor하는 방식으로 시뮬레이션을 바꿀 수 있다. 이로써 Brute Force 방법에서 $(N + 1)$ 만큼의 시뮬레이션 수행을 필요로 한다면, Adjoint Optimization 기법은 이를 Direct와 Adjoint 단 2번의 시뮬레이션으로 최적의 지점을 찾을 수 있다(그림 1). 이 과정을 여러 번 반복하고 구현하고자 하는 물질로 이진화(Binarization)하는 과정을 통해 목적함수에 따른 메타물질의 위상 최적화를 수행한다. 이 기법은 광집적회로[17], 메타렌즈[18] 등에 활용되어 왔으며, 최근 CMOS 이미지센서의 컬러필터로 응용 범위를 넓혀 디스플레이로의 적용 가능성을 엿볼 수 있다[19-21].

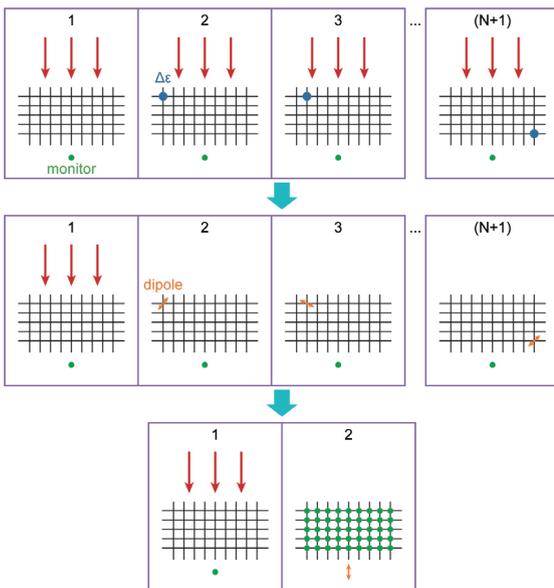


그림 1 Adjoint Optimization 알고리즘 모식도

3. 가시광 메타물질 제조 기술 동향

가시광 메타물질은 서브파장 크기의 나노구조물의 배열과 형상을 정밀하게 제어함으로써 빛의 위상, 진폭, 주파수, 편광 등을 조절할 수 있어 이러한 서브파장 크기의 나노구조물을 정밀하게 제조하는 기술이 매우 중요하다. 이러한 메타패턴을 제조하는 공정 기술로 전자빔 리소그래피(EBL: E-Beam Lithography), 심자외선 리소그래피(DUV: Deep UltraViolet), 나노임프린트 리소그래피 공정 등이 있다. 전자빔 리소그래피는 나노미터 수준의 높은 해상도로 미세패턴을 정밀하게 제조할 수 있는 기술로 정밀한 가시광, 자외선 메타표면 연구 등 학술 연구에 널리 활용되고 있다. 고충형비가 필요한 메타

표면 제조에 있어 고굴절률 산화물 소재를 기반으로 메타표면 제조 기술에 대한 연구로 전자빔 리소그래피 공정으로 미세패턴을 형성한 후 원자층 증착 공정(ALD) 등을 통하여 고굴절률 산화물 소재(TiO_2 등)를 증착하여 패턴을 채운 후 식각 공정(Reactive Ion Etching) 등으로 나머지 부분을 제거하여 고종횡비 패턴을 제작하여 고효율 메타렌즈, 메타 홀로그램 등을 제조하는 기술 등이 보고되었다[22,23]. 또한, 전자빔 리소그래피 공정으로 미세패턴을 형성한 후 고굴절률 소재(산화아연, ZnO) 용액 성장(SPE: Solution Phase Epitaxy) 등을 통하여 패턴을 채워 고종횡비(3:1 이상)를 가지는 메타표면을 제작하여 컬러필터를 구현한 연구 결과가 보고되었다[24].

이러한 전자빔 리소그래피 공정 및 원자층 증착 공정은 가시광 및 자외선 파장 대역에서 고해상도 고종횡비 메타표면 제조에 있어 매우 효과적이지만, 제조 시간 및 비용이 매우 높다는 단점이 있어 상용화에 어려움이 있게 된다. 또한, 용액 성장법은 원자층 증착 공정보다 훨씬 경제적이지만 패턴의 정밀도, 균일도 등이 부족하다는 단점이 있다.

심자외선 리소그래피(DUV Lithography)는 반도체 공정을 이용하여 대면적에 미세패턴을 균일하게 제작할 수 있는 리소그래피 기술로 높은 생산성을 가지는 장점이 있다. CMOS 호환 가능한 실리콘 소재를 중심으로 연구되고 있으며, 최근 193nm ArF 액침노광(Immersion) 리소그래피 기술을 이용하여 100nm 이하급 비정질 실리콘 메타패턴을 12인치(300mm) 웨이퍼에 제작하여 선명한 컬러필터를 구현한 연구가 보고되었다[25,26]. 이러한 심자외선 리소그래피 공정은 대면적 미세패턴의 정밀한 제조가 가능하고 반도체 공정 등에서 검증이 잘 되어 있어 메타렌즈, 메타 홀로그램 등에 활용될 수 있을 것으로 예상된다. 하지만 공정 비용이 높은 편이고, 반도체 호환 소재만 적용 가능하여 이에 대한 상용화

의 어려움이 있다.

나노임프린트 리소그래피는 나노구조물이 형성된 몰드로 찍는 방법으로 손쉽게 나노패턴을 정밀하게 형성할 수 있는 공정 기술로 10nm 이하 크기의 나노패턴까지 정밀한 제조가 가능하며, 대면적에 높은 생산성을 가지고 저비용으로 제조할 수 있는 공정 기술이다. 이러한 나노임프린트 공정 기술은 메타표면을 정밀하고 대면적에 제조 가능하여 활발히 연구되고 있으며, 이를 이용한 다양한 메타표면 제조 결과가 보고되었다. 최근 UV 나노임프린트 공정을 이용하여 산화알루미늄 나노패턴을 형성한 후 이를 마스크로 실리콘 질화물 소재를 식각하여 고종횡비 메타표면 및 메타렌즈를 구현한 연구 결과가 보고되었고, 나노임프린트 공정 및 다층 박막 소재를 이용하여 보다 정밀한 비정질 실리콘 메타표면 제조 및 고종횡비 산화아연 메타표면 제조 결과도 보고되었다[27-29].

메타표면 제조에 있어 공정을 더 간소화하고 고종횡비 메타표면 제조를 용이하게 하기 위해 식각 공정 없이 나노임프린트 공정으로 직접 메타표면을 형성하는 연구도 활발히 진행되고 있다. 최근 연구 결과로 나노임프린트 공정으로 고분자 나노패턴을 형성한 후 고굴절률 이산화티타늄(TiO_2) 원자층 증착 공정을 통하여 식각 공정없이 고종횡비 메타표면을 구현하였고, 이를 통하여 12인치 대면적 고효율 메타렌즈를 구현하였다[30]. 또 다른 방법으로 고굴절률 산화물 나노입자가 분산된 고굴절률 레진 소재를 나노임프린트 공정으로 직접 패턴 공정을 진행하여 고종횡비 메타표면을 대면적에 한번에 제작하는 연구 결과가 최근 활발히 진행되고 있다. 이러한 산화물 나노입자로는 고해상도 나노임프린트 공정 및 산란 손실을 방지하기 위하여 40nm보다 작은 크기를 가지는 고굴절률 나노입자인 이산화티타늄(TiO_2), 산화지르코늄(ZrO_2) 등이 사용되고 있

다. 이산화티타늄 나노입자가 분산된 굴절률 1.9 이상을 가지는 레진 소재를 제작하여 UV 나노임프린트 공정을 통하여 중횡비 8 이상을 가지는 메타표면 및 메타렌즈 제작 결과가 보고되었다[31]. 또한, 이산화티타늄(TiO_2) 나노입자가 분산된 나노임프린트 레진(PER)을 제작하고 최적화하여 열 또는 UV 나노임프린트 공정을 통하여 고효율 홀로그램을 구현하는 연구 결과가 보고되었다[32-34].

산화지르코늄(ZrO_2) 소재는 이산화티타늄(TiO_2) 소재보다 굴절률이 약간 낮아 효율이 떨어지지만 자외선 투과율이 높아 UV 나노임프린트 공정이 더 용이하며 안정성이 높으며, 메타표면의 적용 파장을 자외선 대역까지 넓힐 수 있다는 장점이 있다. 산화지르코늄 나노입자가 분산된 굴절률 1.74 이상을 가지는 레진 소재를 제작하여 중횡비 10 이상의 메타표면을 제작되었고, 산화지르코늄 나노입자가 분산된 나노임프린트 레진(PER)을 제작하고 최적화하여 나노임프린트 공정을 통하여 자외선 메타표면을 구현하였다[11, 35, 36]. 상용화된 고굴절률 나노임프린트 레진(NTTAT, HRI, Inkron, Pixellent 등)을 이용한 메타표면 제조 및 메타렌즈에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다[37, 38]. 이러한 직접 임프린트 공정은 메타표면을 제작함에 있어 고중횡비 메타표면을 쉽게 제조할 수 있으며, 공정 스텝을 줄여 제작 시간과 비용을 최소화할 수 있어 산업적으로 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

III. 응용 분야

1. 컬러필터

컬러필터(CF: Color Filter)는 디스플레이에서 색상을 표현하는 핵심 부품으로 안료 및 염료 등으로 구성된 기존 컬러필터의 경우 안료 크기로 인해 해상도가 1,000ppi 수준으로 낮고, 색상이 어둡고, 안정

성 및 내구성이 낮다는 문제점이 있다. 최근 고해상도 이미지를 위해 픽셀 크기가 점점 작아지고 있고, AR/VR 디스플레이에서는 5,000ppi 이상급 고해상도 픽셀이 요구된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 고해상도가 가능하고 안정성 및 내구성이 우수하며 선명한 색상을 가지는 컬러필터 기술이 연구되어 왔다. 플라즈모닉 메타물질, 페브리-페로(FP) 나노공진 메타구조, 유전체 메타표면 등 메타물질 기반 컬러필터는 높은 신뢰성, 선명한 색상 및 고해상도 픽셀화가 가능하여 디스플레이에서 많은 연구가 진행되고 있다. 플라즈모닉 메타물질 컬러필터는 금속 표면의 플라즈모닉 공진 흡수 특성에 의해 색상이 구현되며, 이러한 특성을 이용하여 넓은 색좌표(sRGB 60%)를 가지는 고해상도 컬러패턴이 구현되었다[39, 40]. 또한, 반사형 플라즈모닉 메타표면(Meta-Mirror)을 OLED 소자에 적용하여 10,000ppi 이상의 고해상도 OLED 컬러픽셀 등이 구현되었다[41].

페브리-페로 나노공진 메타구조는 금속-유전체-금속 다층 구조를 통하여 특정 파장의 빛을 선택적으로 흡수하거나 투과시키는 메타물질로 박막 구조로 리소그래피 공정 없이 간단한 증착 공정으로 제작될 수 있어 많은 관심을 받고 있다. 최근 연구 동향으로 고색순도와 광각 컬러필터를 구현하기 위해 다층 구조의 페브리-페로 나노공진 구조에 대한 연구가 진행되고 있으며, 다층 구조를 이용하여 넓은 색좌표(sRGB) 및 40도 이상의 광각을 가지는 고효율 컬러필터 기술이 보고되었으며, 다중 나노공진 구조를 OLED 소자에 적용하여 선명한 컬러를 구현한 연구 결과 등이 보고되었다[42-45]. 하지만 페브리-페로 나노공진 구조는 다른 두께를 가지는 픽셀의 집적화가 어려워 고해상도 픽셀에 적용하기에 어려움이 있다.

유전체 메타표면 컬러필터는 Mie 산란 공명에 기

인하여 메타표면의 직경, 주기, 두께, 높이 등을 조절하여 선명한 색상을 구현할 수 있는 기술로 고해상도 픽셀로 집적화가 가능하며 상대적으로 손실이 적어 디스플레이에서 많은 관심을 받고 연구되고 있다. 넓은 색좌표를 가지는 선명한 색상을 구현하기 위해 고굴절률 유전체 소재를 기반으로 연구가 되고 있다. 결정질 실리콘 소재를 기반으로 고색순도(181% sRGB) 컬러픽셀이 보고되었고, 36,000dpi 이상 고해상도 컬러픽셀이 보고되었다[46-48]. 결정질 실리콘보다 집적 공정이 용이한 비정질 실리콘 기반 컬러픽셀로 CMOS 공정 기반으로 넓은 색순도(100% sRGB) 컬러픽셀이 보고되었고, 25,400dpi 이상의 고해상도 픽셀이 구현되었다[26,49]. 손실이 낮은 실리콘 질화막 등을 이용한 유전체 메타표면 컬러필터로 높은 반사 효율(77% 이상)을 가지며 고색순도(120% 이상 sRGB) 및 고해상도(18,000dpi 이상) 등을 가지는 컬러픽셀 등이 보고되었다[50,51].

이러한 메타표면 컬러필터는 고해상도 픽셀 및 고색순도 등이 가능하여 디바이스에 적용하여 AR/VR 등 초고해상도 디스플레이에 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

2. 홀로그래피

홀로그래피는 빛의 간섭 현상을 이용하여 입체 정보를 기록하고 재생하는 3차원 영상 기술로 메타표면 홀로그래피는 서브파장 이하 크기의 구조로 인해 홀로그래피의 소형화, 넓은 시야각등이 가능하며, 진폭, 위상, 편광 정보 등의 복소변조가 가능하고 정보손실 없는 고품질 3D 홀로그래피 가능하여 많은 관심을 받고 있다. 최근 연구 방향으로 메타표면을 이용하여 복소변조가 가능하며 고효율로 동작하는 풀컬러 홀로그래피에 대한 연구가 보고

되고 있다. 풀컬러 메타표면은 각기 다른 파장에 대해 동작해야 하여 이에 따른 기술 난제가 존재한다. 최근 연구 동향으로 비정질 실리콘 소재를 기반으로 복소변조 메타표면을 구현하고 이를 기반으로 RGB 파장에서 동작하는 컬러 홀로그래피가 보고되었다[52,53]. 또한, 고굴절률 저손실 이산화티타늄 소재 및 역설계 기법을 통하여 최적화된 메타구조를 설계, 제작하여 가시광파장 대역에서 고효율(Red 61.7%, Green 75.5%, Blue 51.6%)로 동작하는 컬러 홀로그래피를 구현하였다[54].

메타표면 홀로그래피 기술의 또 다른 최근 연구 방향으로 기존 정적인 이미지가 아닌 동적화된 홀로그래피 구현 기술이 있다. 이를 위해서는 메타물질의 높은 변조율, 빠른 변조 속도 등이 필요하여 이를 통하여 고해상도 광시야각 3D 동적 홀로그래피가 가능할 것으로 예상된다. 이를 해결하기 위해 다양한 능동소재(상변화물질(PCM: Phase Change Material), 전기광학변조(EO: Electro-Optic) 소재, 전기변색(EC: ElectroChromic) 소재, 액정(LC: Liquid Crystal) 소재) 등과 결합하여 연구가 진행되고 있다[55-58].

또다른 접근 방법으로 메타표면으로 이루어진 다중 프레임 순차적으로 재구성하여 동적화하는 연구가 보고되었고 이를 통하여 2.3K 이상의 높은 해상도를 가지며 56fps의 속도 및 프레임수 30개 이상의 동적 홀로그래피를 구현하였다[59,60].

IV. ETRI 연구 동향

ETRI에서는 디스플레이(OLED, 홀로그래피, AR/VR 등)에 적용하기 위한 가시광 메타물질의 소재 기술, 나노 공정 및 소자화 기술 등에 대한 연구를 진행하고 있다[61-66]. 디스플레이 소자 및 공정 기술을 기반으로 OLEDoS 소자에 메타표면을 적용하여 고해상도 컬러픽셀을 구현하는 연구를 진행하고 있

으며, 메타표면 제조 기술로 반도체 공정에 적용이 가능한 고해상도 패턴이 가능한 나노임프린트 공정 기술을 기반으로 비정질 실리콘 등 고효율 메타표면을 제작하여 AR/XR용 모노리식 고색순도 고해상도 메타 OLEDoS 디스플레이 소자를 개발하고 있다. 또한, 고화질 홀로그램 구현을 위한 능동 복소변조 메타표면 및 홀로그램 픽셀 어레이 소자 기술을 개발하고 있다.

V. 결론

가시광 메타물질 기술은 서브파장 크기의 나노구조물을 통하여 가시광파장 영역에서 빛의 위상, 진폭, 편광 등 정보를 마음대로 조절할 수 있어 AR/VR 등 차세대 디스플레이에 적용될 수 있는 핵심 원천 기술이다. 가시광 메타물질의 디스플레이 적용을 위해서는 고굴절률 저손실 메타표면 소재 기술, 고해상도 고정밀 나노패턴 대면적 제조 기술, 메타표면 최적화 설계 기술 등 기술 개발이 필요하게 된다.

ETRI에서 연구·개발된 다양한 가시광 메타물질 기술은 앞으로 디스플레이에 적용되어 디스플레이 부품의 소형화, 집적화 등이 가능하여 OLED, 홀로그램, AR/VR 등에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

가시광 메타물질을 통하여 기존 디스플레이 부품의 기술적 한계를 극복하고, 고해상도, 고효율 광시야각 기술등을 확보하여, 빠른 속도로 성장하고 있는 첨단 디스플레이 산업의 활성화에 크게 이바지할 수 있을 것으로 기대한다.

약어 정리

ALD	Atomic Layer Deposition
CF	Color Filter
EBL	E-Beam Lithography

EC	ElectroChromic
EO	Electro-Optic
FoV	Field of View
FP	Fabry Perot
fps	frame per second
LC	Liquid Crystal
OLED	Organic Light Emitting Diode
OLEDoS	OLED on Silicon
PCM	Phase Change Material
PSO	Particle Swarm Optimization
RIE	Reactive Ion Etching
SPE	Solution Phase Epitaxy
SRN	Silicon Rich Nitride

참고문헌

- [1] D.R. Smith et al., "Metamaterials and Negative Refractive Index," *Sci.*, vol. 305, 2002, pp. 788-792.
- [2] BCC Research, "Technologies and Global Markets," 2019.
- [3] J.-H. Yang et al., "Structural Colors Enabled by Lattice Resonance on Silicon Nitride Metasurfaces," *ACS Nano*, vol. 14, no. 5, 2020, pp. 5678-5685.
- [4] J. Jang et al., "Full And Gradient Structural Colouration By Lattice Amplified Gallium Nitride Mie-Resonators," *Nanoscale*, vol. 12, 2020, pp. 21392-21400.
- [5] Y. Yang et al., "Revealing Structural Disorder in Hydrogenated Amorphous Silicon for a Low-Loss Photonic Platform at Visible Frequencies," *Adv. Mater.*, vol. 33, 2021. doi: 10.1002/adma.202005893
- [6] O. Goldberg et al., "Silicon Rich Nitride Huygens Metasurfaces in the Visible Regime," *Adv. Optical. Mater.*, vol. 12, 2024. doi: 10.1002/adom.202301612
- [7] W. Chen et al., "Immersion Meta-Lenses at Visible Wavelengths for Nanoscale Imaging," *Nano Lett.*, vol. 17, 2017, pp. 3188-3194.
- [8] M. Biabanifard et al., "ZrO₂ Holographic Metasurfaces for Efficient Optical Trapping in The Visible Range," *Adv. Optical. Mater.*, vol. 12, 2024.
- [9] C. Zhang et al., "Low-Loss Metasurface Optics Down To The Deep Ultraviolet Region," *Light: Sci. Appl.*, vol. 9, 2020. doi: 10.1038/s41377-020-0287-y
- [10] J. Kim et al., "One-Step Printable Platform For High-Efficiency Metasurfaces Down To The Deep-Ultraviolet Region," *Light: Sci. Appl.*, vol. 12, 2023.
- [11] G. Kim et al., "Metasurface-Driven Full-Space

- Structured Light for Three-Dimensional Imaging," *Nat. Commun.*, vol. 13, 2022.
- [12] J. Kim et al., "8" Wafer-Scale, Centimeter-Sized, High-Efficiency Metalenses in the Ultraviolet," *Materials Today*, vol. 73, 2024, pp. 9–15.
- [13] C. Zhang et al., "Tantalum Pentoxide: A New Material Platform For High-Performance Dielectric Metasurface Optics In The Ultraviolet And Visible Region," *Light: Sci. Appl.*, vol. 13, 2024.
- [14] Y. Kim et al., "Inverse Design Of Compact Silicon Photonic Waveguide Reflectors And Their Application For Fabry-Perot Resonators," *Nanophoton.*, vol. 13, no. 15, 2024, pp. 2829–2837.
- [15] F.A.A. Nugroho et al., "Inverse designed plasmonic metasurface with parts per billion optical hydrogen detection," *Nature Commun.*, vol. 13, no. 1, 2022.
- [16] C.M. Lalau-Kerally et al., "Adjoint Shape Optimization Applied To Electromagnetic Design," *Opt. Express.*, vol. 21, no. 18, 2013, pp. 21693–21701.
- [17] A.Y. Piggott et al., "Inverse Design And Demonstration Of A Compact And Broadband On-Chip Wavelength Demultiplexer," *Nature Photon.*, vol. 9, no. 6, 2015, pp. 374–377.
- [18] H. Chung et al., "High-NA Achromatic Metalenses By Inverse Design," *Opt. Express*, vol. 28, no. 5, 2020, pp. 6945–6965.
- [19] P.B. Catrysse et al., "Subwavelength Bayer RGB Color Routers With Perfect Optical Efficiency," *Nanophoton.*, vol. 11, no. 10, 2022, pp. 2381–2387.
- [20] S. Lee et al., "Inverse Design Of Color Routers In Cmos Image Sensors: Toward Minimizing Interpixel Crosstalk," *Nanophoton.*, vol. 13, no. 20, 2024, pp. 3895–3914.
- [21] X. Zou et al., "Pixel-Level Bayer-Type Colour Router Based On Metasurfaces," *Nature Commun.*, vol. 13, no. 1, 2022. doi: 10.1038/s41467-022-31019-7
- [22] M. Khorasaninejad et al., "Metalenses At Visible Wavelengths: Diffraction-Limited Focusing And Subwavelength Resolution Imaging," *Sci.*, vol. 352, 2016, pp. 1190–1194.
- [23] Z. Li et al., "One-Time Pad Incoherent Encryption with Optical Meta-Ciphertext and Dynamic Visual Keys," *ACS Photon.*, vol. 11, 2024, pp. 4434–4443.
- [24] H. Liu et al., "Dielectric Metasurface from Solution-Phase Epitaxy of ZnO Nanorods for Subtractive Color Filter Application," *Adv. Optical. Mater.*, vol. 9, 2021.
- [25] Z. Xu et al., "Metasurface-Based Subtractive Color Filter Fabricated On A 12-Inch Glass Wafer Using A CMOS Platform," *Photon. Res.*, vol. 9, 2021, pp. 13–20.
- [26] E. Khaidarov et al., "Large-Scale Vivid Metasurface Color Printing Using Advanced 12-In. Immersion Photolithography," *Sci. Rep.*, vol. 12, 2022.
- [27] A. McClung et al., "Visible Metalenses with High Focusing Efficiency Fabricated Using Nanoimprint Lithography," *Adv. Optical. Mater.*, vol. 12, 2024.
- [28] G. Prone et al., "Scalable, Nanometer-Accurate Fabrication of All-Dielectric Metasurfaces with Narrow Resonances Tunable from Near-Infrared to Visible Wavelengths," *Adv. Photon. Res.*, vol. 3, 2022.
- [29] D. Quan et al., "Dielectric Metalens by Multilayer Nanoimprint Lithography and Solution Phase Epitaxy," *Adv. Eng. Mater.*, vol. 25, 2023.
- [30] J. Kim et al., "Scalable Manufacturing Of High-Index Atomic Layer-Polymer Hybrid Metasurfaces For Metaphotonics In The Visible," *Nat. Mater.*, vol. 22, 2023, pp. 474–481.
- [31] V.J. Einck et al., "Scalable Nanoimprint Lithography Process for Manufacturing Visible Metasurfaces Composed of High Aspect Ratio TiO₂ Meta-Atoms," *ACS Photon.*, vol. 8, 2021, pp. 2400–2409.
- [32] W. Kim et al., "Thermally-Curable Nanocomposite Printing For The Scalable Manufacturing Of Dielectric Metasurfaces," *Microsyst. Nanoeng.*, vol. 8, 2022.
- [33] J. Kim et al., "Metasurface Holography Reaching the Highest Efficiency Limit in the Visible via One-Step Nanoparticle-Embedded-Resin Printing," *Laser Photon. Rev.*, vol. 16, 2022.
- [34] G. Yoon et al., "Single-Step Manufacturing Of Hierarchical Dielectric Metalens In The Visible," *Nat. Commun.*, vol. 11, 2020.
- [35] M. Miyata et al., "Scalable Direct Printing Of Visible-Light Metasurfaces Composed Of An Industrial ZrO₂-Composite Imprint Material," *Opt. Mater. Express*, vol. 12, no. 10, 2022, pp. 4169–4181.
- [36] H. Kang et al., "Tailoring High-Refractive-Index Nanocomposites For Manufacturing Of Ultraviolet Metasurfaces," *Microsyst. Nanoeng.*, vol. 10, 2024.
- [37] J. Gong et al., "Simple Route For High-Throughput Fabrication Of Metasurfaces Using One-Step Uv-Curable Resin Printing," *Opt. Express*, vol. 31, no. 5, 2023, pp. 8068–8080.
- [38] J. Gong et al., "Visible Meta-Displays for Anti-Counterfeiting with Printable Dielectric Metasurfaces," *Adv. Sci.*, vol. 11, 2024. doi: 10.1002/advs.202308687
- [39] P. Cencillo-Abad et al., "Ultralight Plasmonic Structural Color Paint," *Sci. Adv.*, vol. 8, 2023.
- [40] L. Shi et al., "Deep Subwavelength Wide-Angle Structural Colors at the Single Pixel Level," *Adv. Opt. Mater.*, vol. 10, 2022. doi: 10.1002/adom.202200552

- [41] W. Joo et al., "Metasurface-Driven OLED Displays Beyond 10,000 Pixels Per Inch," *Sci.*, vol. 370, 2020, pp. 459-463.
- [42] W. Qian et al., "Lithography-Free Nanofilm Color Filters Composed of CMOS-Compatible Materials," *IEEE Photon. Tech.*, vol. 33, 2021, pp. 672-675.
- [43] H. Kwak et al., "Resonant-Mode Engineering For Additive Reflective Structural Colors With High Brightness And High Color Purity," *Sci. Rep.*, vol. 14, 2024. doi: 10.1038/s41598-024-64176-4
- [44] Z. Duan et al., "Reflective Full-Color Structural Colors with High Brightness and High Purity Based on $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$ Chalcogenide Film," *Adv. Opt. Mater.*, vol. 12, 2024. doi: 10.1002/adom.202301577
- [45] J.Y. Kim et al., "Dual-Microcavity Technology for Red, Green, and Blue Electroluminescent Devices," *Adv. Func. Mater.*, vol. 33, 2023. doi: 10.1002/adfm.202305528
- [46] W. Yang et al., "All-Dielectric Metasurface For High-Performance Structural Color," *Nat. Commun.* vol. 11, 2020. doi: 10.1038/s41467-020-15773-0
- [47] L. Li et al., "Bright Field Structural Colors in Silicon-on-Insulator Nanostructures," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 13, 2021, pp. 4364-4373.
- [48] Y. Bao et al., "Full-Colour Nanoprint-Hologram Synchronous Metasurface With Arbitrary Hue-Saturation Brightness Control," *Light: Sci. Appl.*, vol. 8, 2019.
- [49] W. Yue et al., "Polarization-Encrypted High-Resolution Full-Color Images Exploiting Hydrogenated Amorphous Silicon Nanogratings," *Nanophoton.*, vol. 9, no. 4, 2020, pp. 875-884.
- [50] X. Gu et al., "Multilayer All-Dielectric Metasurfaces Expanding Color Gamut," *Nanophotonics*, vol. 13, no. 19, 2024, pp. 3749-3763.
- [51] B. Yang et al., "Ultra-highly Saturated Structural Colors Enhanced by Multipolar-Modulated Metasurfaces," *Nano Lett.*, vol. 19, 2019, pp. 4221-4816.
- [52] Y. Yin et al., "Color Holographic Display Based on Complex-Amplitude Metasurface," *Laser Photon. Rev.*, 2024. doi: 10.1002/lpor.202400884
- [53] L. Jin et al., "Noninterleaved Metasurface for (26-1) Spin- and Wavelength-Encoded Holograms," *Nano Lett.*, vol. 18, 2018, pp. 7421-8072.
- [54] S. So et al., "Multicolor and 3D Holography Generated by Inverse-Designed Single-Cell Metasurfaces," *Adv. Mater.*, vol. 35, 2023. doi: 10.1002/adma.202208520
- [55] X. Chang et al., "Electrically Tuned Active Metasurface Towards Metasurface-Integrated Liquid Crystal On Silicon (meta-LCoS) Devices," *Opt. Express*, vol. 31, no. 4, 2023, pp. 5378-5387.
- [56] P. Moitra et al., "Electrically Tunable Reflective Metasurfaces with Continuous and Full-Phase Modulation for High-Efficiency Wavefront Control at Visible Frequencies," *ACS Nano*, vol. 17, no. 17, 2023, pp. 16952-16959.
- [57] T. Naeem et al., "Dynamic Chiral Metasurfaces for Broadband Phase-Gradient Holographic Displays," *Adv. Optical Mater.*, vol. 11, 2023.
- [58] S. Manhsa et al., "High Resolution Multispectral Spatial Light Modulators Based On Tunable Fabry-Perot Nanocavities," *Light Sci. Appl.*, vol. 11, 2022.
- [59] M. Yamaguchi et al., "Highly-Efficient Full-Color Holographic Movie Based On Silicon Nitride Metasurface," *Nanophoton.*, vol. 13, no. 8, 2024, pp. 1425-1443.
- [60] R. Izumi et al., "Metasurface Holographic Movie Acinematographic Approach," *Opt. Express*, vol. 28, no. 16, 2020, pp. 23761-23770.
- [61] S.J. Kim et al., "Solution-Processable Nanocrystal-Based Broadband Fabry-Perot Absorber for Reflective Vivid Color Generation," *ACS Appl. Mater. Interface.*, vol. 11, no. 7, 2019, pp. 7280-7287.
- [62] S.J. Kim et al., "Generation Of Highly Integrated Multiple Vivid Colours Using A Three-Dimensional Broadband Perfect Absorber," *Sci. Rep.*, vol. 9, no. 1, 2019. doi: 10.1038/s41598-019-49906-3
- [63] S.J. Kim et al., "Reconfigurable, Vivid Reflective Colors Based On Solution-Processed Fabry-Perot Absorber Using Thermochromic Vanadium Dioxide," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 565, 2021. doi: 10.1016/j.apsusc.2021.150610
- [64] B. Ko et al., "Multilevel Absorbers via the Integration of Undoped and Tungsten-Doped Multilayered Vanadium Dioxide Thin Films," *ACS Appl. Mater. Interface.*, vol. 14, no. 1, 2022, pp. 1404-1412.
- [65] C. Jung et al., "Disordered-Nanoparticle-Based Etalon For Ultrafast Humidity-Responsive Colorimetric Sensors And Anti-Counterfeiting Displays," *Sci. Adv.*, vol. 8, 2022. doi: 10.1126/sciadv.abm8598
- [66] J. Ahn et al., "Extremely Stable Ag-Based Photonics, Plasmonic, Optical, and Electronic Materials and Devices Designed with Surface Chemistry Engineering for Anti-Tarnish," *Small*, vol. 20, no. 31, 2024.