

# 디지털 홀로그래피를 위한 SLM 기술

김용해, 황치선, 추혜용  
한국전자통신연구원

## 요약

본고에서 디지털 홀로그래피를 위한 SLM중 대표적인 몇 가지 기술에 대한 동향을 살펴보았다. 먼저 SLM픽셀 피치에 따른 홀로그램 영상의 특성에 대해 논의하고, 픽셀화된 SLM으로써 현재 상용화 되고 있는 DMD SLM 과 LCoS SLM의 특성에 대해 살펴 보았다. 픽셀화 되지 않은 SLM 인 음향 광학 변조기와 OASLM 에 대해서도 살펴 보았다. 양질의 디지털 홀로그래피를 구현하기 위하여 궁극적으로 필요한 픽셀 피치  $1\mu\text{m}$  이하 SLM 의 개발 현황과 복소 변조 SLM 에 대해서도 알아보았다.

## I. 서론

CRT로 시작된 전자디스플레이 기술은 TFT-LCD, PDP, AMOLED등의 평판 디스플레이 기술로 진화하였고, 향후에는 플렉서블 (혹은 스트레처블) 디스플레이, 공간 디스플레이로 발전될 것으로 예상되고 있다. 관찰자에게 디스플레이 되는 사물의 입체감을 느낄 수 있게 하는 3D 디스플레이는 이러한 공간 디스플레이의 일종으로 최근 급속한 발전이 이루어지고 있다. 여러 종류의 3D 디스플레이 중 홀로그래피는 가장 자연스러운 시차를 제공함으로써 궁극적으로 지향해야 할 디스플레이로 알려져 있다. 이러한 홀로그래피를 구현하기 위해서는 공간 광 변조기(Spatial Light Modulator, SLM)이 필요하다. 특히 디지털 홀로그래피에서는 전기 혹은 광학적 방법으로 변조가 가능한 SLM이 요구되고 있다.

공간 광 변조 는 빛을 어떤 형태로든 변화시키는 것을 나타내는 말이다. 쉽게 접할 수 있는 예가 Overhead projector인데 컴퓨터에 의해 모니터에 나타난 내용을 스크린에 표시하기 위하여 빛의 투과도를 조절하는 SLM이 내장되어 있다. 보통 SLM 은 빛의 세기를 조절하지만 경우에 따라 빛의 위상만을, 또는 세기와 위상 모두를 조절 할 수도 있다.

본고에서는 디지털 홀로그래피를 위해 필요한 SLM에서 픽셀

피치에 따른 시야각의 변화를 살펴본다. 그리고 현재 사용되는 대표적인 SLM 의 구조 및 동작 원리를 소개한다. 다음으로 현재 활발히 연구되고 있는 기술동향에 대해 소개한다. 그리고 V 장에서 결론을 내린다.

## II. SLM 픽셀 피치에 디지털 홀로그램 영상 시야각의 변화

디지털 홀로그래피에 사용되는 SLM 의 특성은 픽셀 피치 ( $p$ )에 의해 결정된다. <그림 1>은 SLM 의 픽셀 피치와 빛의 회절 각도와와의 관계를 나타내는데, 디지털 홀로그래피에 의해 생성되는 3차원 상은 이 회절각도 안에 존재하게 된다. 따라서 회절 각도가 매우 작아지면 3차원 상도 관찰하기가 어려워 지게 된다. <표 1>은 SLM 의 픽셀 피치와 빛의 회절각도를 나타낸 것이다. 픽셀피치가  $1\mu\text{m}$  이하인 SLM 에서는 빛의 회절각도가 150 이상이기 때문에 3차원 상을 직접적으로 관찰하는 것이 가능하지만, 현재 상용화된 동적SLM 에서는 위의 조건을 만족시키는 제품이 없고, 정적 SLM 에서는 위의 조건을 만족시키는 방법이 개발되고 있다.

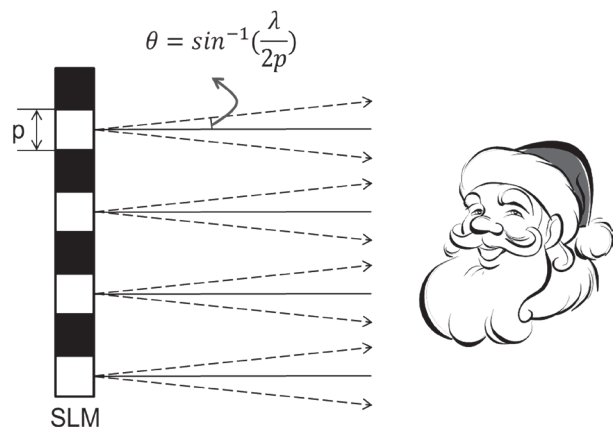


그림 1. SLM 의 픽셀피치와 빛의 회절각도 관계

표 1. SLM픽셀 피치와 빛의 회절각도 비교

픽셀피치	회절각 (θ)		
	λ=473 nm	λ=532 nm	λ=633 nm
60 μm	0.2°	0.3°	0.3°
10 μm	1.4°	1.5°	1.8°
1 μm	13.7°	15.4°	18.5°
0.5 μm	28.2°	32.1°	39.3°

한편 픽셀피치가 10 μm 인 SLM 에서는 빛의 회절각도가 2° 이하이기 때문에 3차원 상을 직접적으로 관찰하는 것이 불가능 하기 때문에 렌즈를 이용하여 빛을 모아줄 필요가 있다. <그림 2>는 초점거리 f 인 렌즈를 이용할 경우에 디지털 홀로그래피에 의해 형성되는 3차원 상의 크기 및 관찰자의 시야각을 나타낸 그림이다.

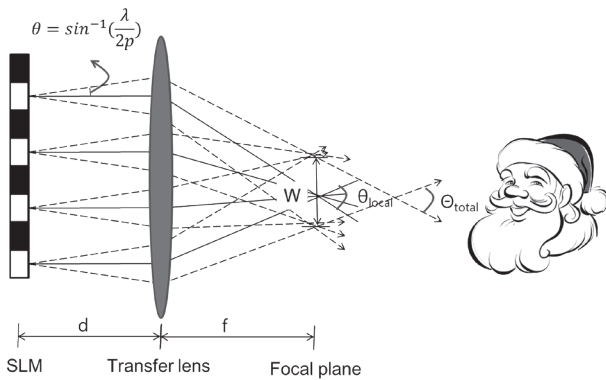


그림 2. 초점거리 f 인 렌즈를 이용하여 디지털 홀로그래피에 의해 형성된 3차원 상의 크기 및 관찰자의 시야각 특성

SLM 에 의해 회절된 빛은 렌즈에 의해 초점면에 모이게 되는데 이때 형성되는 상의 크기 (W), 지역 시야각 (θ<sub>local</sub>), 전체 시야각 (θ<sub>total</sub>) 은 다음과 같이 표시된다[1].

$$W = \frac{\lambda f}{p}$$

$$\theta_{local} = \frac{Len}{f}$$

$$\theta_{total} = 2 \tan^{-1} \left[ \frac{Len}{2f} - \frac{\lambda}{2p} \left( 1 - \frac{d}{f} \right) \right]$$

여기서 d 는 SLM 과 렌즈와의 거리, Len 은 SLM 의 한 축 방향 크기, p 는 픽셀피치를 나타낸다. <표 2>에서 보듯이 픽셀 피치가 10 μm 이상에서도 지역 시야각 특성이 확보되는 것을 알 수 있다. 대신 3차원 상의 크기는 수십 mm 로 작게 나타나고, 렌즈의 초점면에만 생성되기 때문에 관찰자의 눈의 위치를 정확히 파악하는 기술이 필요하게 된다. 따라서 이러한 3차원

상의 크기 증대와 시야각의 확대 등 홀로그래피 영상의 화질 개선을 위해 1 μm 이하의 작은 픽셀 피치를 가지는 SLM의 개발이 요구되고 있다.

표 2. 렌즈를 이용하여 형성된 3차원 상의 크기 및 관찰자의 시야각 비교 (f = 0.25 m, Len = 0.1 m, d = 2.5 m, λ = 532 nm)

픽셀피치	상크기 (W)	지역 시야각 (θ <sub>local</sub> )	전체 시야각 (θ <sub>total</sub> )
60 μm	2 mm	22.60	27.00
10 μm	13 mm	22.60	47.40
1 μm	133 mm	22.60	137.80
0.5 μm	266 mm	22.60	157.30

### III. 상용화된 SLM 의 구조 및 작동원리

SLM은 크게 픽셀화된 SLM과 픽셀화되지 않은 SLM으로 나눌 수 있는데, 현재 상용화된 SLM 은 픽셀화된 방식이며, MEMS (Micro Electro Mechanical System) 기술을 이용한 DMD (Digital Micro Mirror) 와 액정 기술을 이용한 LCoS (Liquid Crystal on Silicon) 가 사용되고 있다.

표 3. 상용 SLM 제품의 특성 비교

구분	DMD	LCoS	
제조회사	TI	JVC	Holoeye
크기 (inch)	1.38"	1.75"	0.55"
해상도	4096 x 2160	8192 x 4320	1920 x 1080
픽셀 피치	7.6 μm	4.8 μm	6.4 μm
변조방법	진폭 (Micromirror)	진폭 (VAN LC)	위상 (ECB LC)

#### 1. DMD SLM

DMD 는 TI 에서 개발된 기술로 현재 시판되는 DLP 프로젝터에서 사용되고 있다. SLM으로 사용되는 DMD 는 수 백만 개 이상의 Micromirror 집합으로 구성되어 있다. 각각의 Micromirror 는 입력되는 신호에 따라 <그림 3>과 같은 동작 특성을 나타낸다 [2]. 즉 On 상태에서는 Micromirror 가 램프 방향으로 (+120) 기울게 되어 램프의 빛이 프로젝터 렌즈로 향하게 되고, Off 상태에서는 Micromirror 가 램프 반대방향으로 (-120) 기울게 되어 램프의 빛이 흡수체 (Light Absorber) 로 향하게 된다.

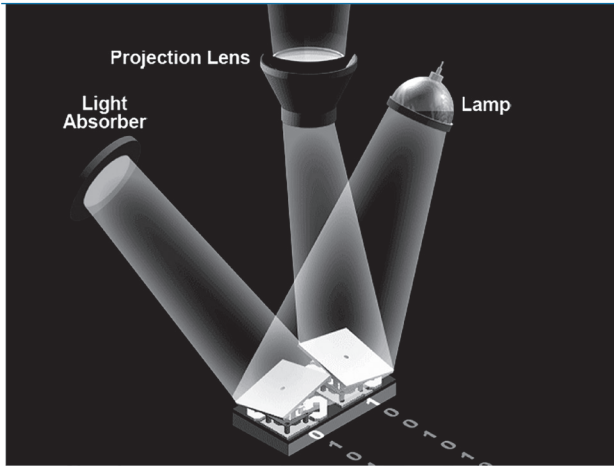


그림 3. 입력되는 신호에 따른 Micromirror 의 동작특성 [2]

〈그림 4〉는 Micromirror 의 3차원 구조를 나타낸다[2]. 알루미늄으로 형성된 Micromirror 의 반사판은 비아 (Via) 를 통하여 토션 힌지 (Torsion hinge) 에 연결된다. 또한 각 Micromirror 의 아래 부분은 스프링에 의해 지탱되고 있고, 2 개의 전극은 Micromirror 를 2개의 상태 ( $\pm 120$ ) 로 유지시키는 역할을 한다.

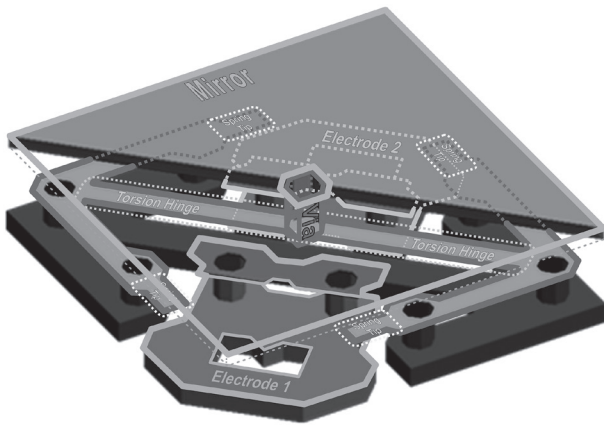


그림 4. Micromirror 의 3차원 구조 [2]

〈그림 5〉는 Micromirror 를 구동하는 CMOS 메모리 구조를 나타낸다. Micromirror 의 2개의 전극은 CMOS 메모리에 연결되어 있어서 CMOS 메모리 상태가 바뀔때 따라 Micromirror 의 2개 전극에 가해지는 전압도 달라지게 된다. 그러나 Micromirror 의 전압에 따라 Micromirror 상태가 변하기 위해서는 Mirror clocking pulse 를 이용하여 리셋하는 과정이 필요하다.

현재 상용화된 DMD 의 최소 픽셀 피치는  $7.6\mu\text{m}$  이며 빛의 세기만을 변화시킬 수 있다. 이진동작 이므로 음영을 표시하기 위해서는 Micromirror 를 빠른 속도로 동작시켜 시분할 구동을

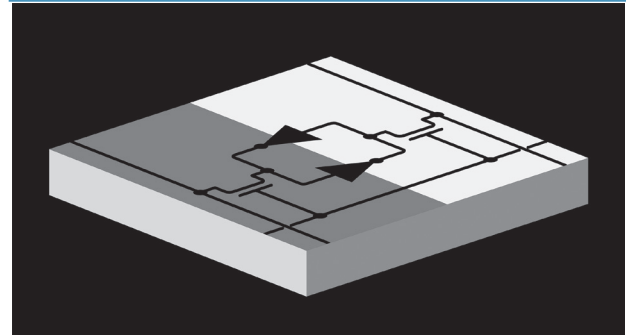


그림 5. Micromirror 에 사용되는 CMOS 메모리 구조 [2]

하여야 한다.

## 2. LCoS SLM

LCoS 는 기존의 실리콘 기반 CMOS 반도체 기판 기술과 다양한 액정 동작모드를 결합하여 구현한 SLM 이다[3]. LCoS 는 실리콘 반도체 기술을 이용하기 때문에 MEMS 기술이나 AMLCD 기술에 비해 작은 픽셀피치와 높은 필팩터 (Fill Factor) 의 구현이 가능하다는 장점이 있다. 또한 액정 기술은 빛의 위상 및 편광 특성을 직접적으로 조절 할 수 있어서 SLM 의 다양한 모드가 가능하다.

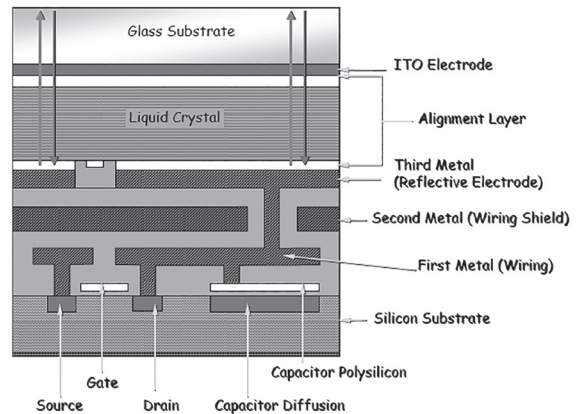


그림 6. LCoS 의 단면 구조

〈그림 6〉은 LCoS 의 단면 구조를 나타낸다[4]. 실리콘 기판 상에 형성된 백플레인인 MOSFET 공정을 이용하여 형성한 트랜지스터와 캐패시터, 빛차단층 (Light Blocking Layer), 그리고 반사판으로 형성한다. 여기서 반사판은 액정의 전극으로도 작동해야 하므로 비아를 통하여 트랜지스터의 드레인과 캐패시터에 연결된다. 또한 빛차단층은 반사판사이의 틈으로 들어오는 빛에 의한 트랜지스터와 캐패시터의 오동작을 방지하고자 하는 목적으로 추가되었다.

반사판에 걸리는 전압에 따라 액정은 구동되는데, 입사하는 빛의 편광 및 편광판의 방향에 따라 다양한 모드가 가능해진다. LCoS SLM 이 빛의 세기를 바꾸고자 할 경우에는 주로 Hybrid Twisted Nematic (HTN) 모드와 Vertically Aligned Nematic (VAN) 모드를 사용하고 빛의 위상을 바꾸고자 할 경우에는 Electrically Controlled Birefringence (ECB) 모드를 주로 사용한다.

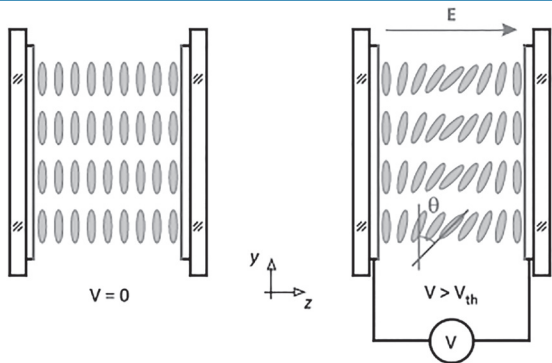


그림 7. 전압에 따른 ECB 모드 액정의 움직임 [4]

<그림 7>은 전압에 따른 ECB 모드 액정의 움직임을 나타낸 것이다[4]. 전압이 인가되지 않았을 경우에는 액정이 전극 표면에 나란히 정렬되어 있지만, 전압이 문턱전압 이상으로 인가되면 액정이 전기장 방향으로 틀어지려고 한다. 그런데 액정의 유전율 이방성 특성 때문에 빛의 편광방향이 y 축 이라면 전압에 따라서 맞물려 빛의 속도가 달라지게 된다. 즉 인가되는 전압에 따라 빛의 위상을 변화시킬 수 있는 것이다. <그림 8>은 전압에 따른 빛의 위상변화를 측정한 그림으로 위상이  $2\pi$  이상으로 변하는 전압범위를 설정할 수 있음을 알 수 있다.

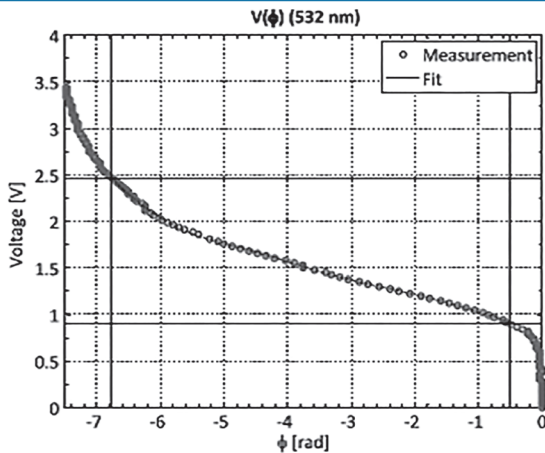


그림 8. 전압에 따른 ECB 모드 액정의 위상 변화 [4]

<그림 9>는 양산되는 LCoS의 패널 크기와 픽셀 개수를 나타낸 그림이다[5].

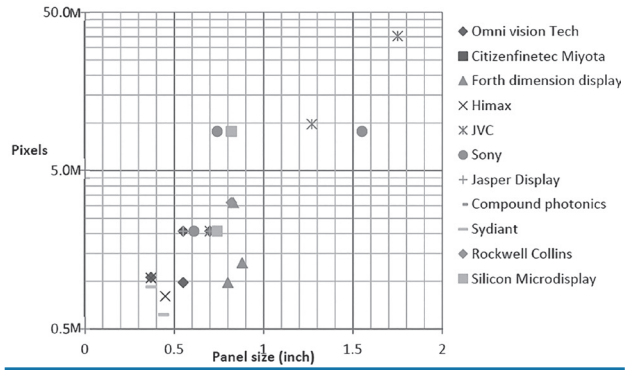


그림 9. 양산되는 LCoS의 패널 크기 와 픽셀 개수 [5]

현재 상용화 된 LCoS의 최소 픽셀 피치는  $4.8\mu\text{m}$ 로 JVC에서 발표하였고 액정의 VAN 모드를 사용하여 빛의 세기를 변화시켰다[5]. Holoeye는  $6.4\mu\text{m}$ 의 픽셀 피치를 가지는 LCoS를 양산하고 있으며 액정의 ECB 모드를 사용하여 빛의 위상을 변화시키고 있다[6].

## IV. SLM 연구 동향

### 1. 픽셀화 되지 않은 SLM의 구조 및 작동원리

DMD SLM과 LCoS SLM은 최소단위가 픽셀화 되어 있어서 홀로그램 생성시의 고차항의 회절현상이 불가피하다. MIT에서 오랫동안 연구되어 온 음향 광학 변조기 (Acoustic Optic Modulator) 및 빛에 의해 구동되는 OASLM (Optically Addressed SLM) 등은 연속적인 SLM의 구현이 가능하여 픽셀화 에러를 회피할 수 있다.

#### 1.1 음향 광학 변조기

음향 광학 변조기는 물질 내를 진행하는 음파와 빛의 상호 작용에 의해 빛을 변조하는 SLM이다. 체적 음향 광학 변조기는 1 Mega pixels/s의 변조를 할 수 있지만 집적화하기 어렵다는 단점 때문에 표면 음향 광학 변조기를 이용한 방법이 개발되었다[7]. <그림 10>은 표면 음향 광학 변조기를 이용한 비대칭 누설모드 변조기 (Anisotropic leaky-mode modulator)의 구조이다. 비대칭 누설모드 변조기에서 사용되는 비대칭 도파관 (waveguide)은 TE 편광만이 통과하도록 만들어져 있고 SAW 변환기 (transducer)는 홀로그램 정보가 들어가 있는 RF 신호에 의해 표면 음파 (Surface acoustic waves)를 만들어 낸다. 이 음파와 도파관을 진행하는 빛의 위상이 맞는 조건에서 빛은 회절되어 TM 편광으로 나타난다.

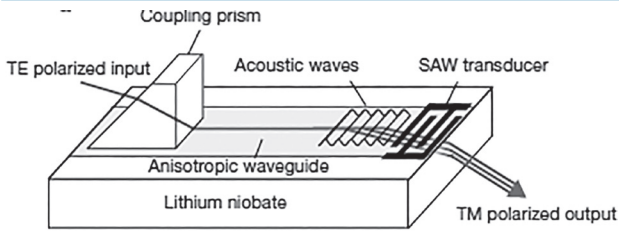


그림 10. 표면 음향 광학 변조기를 이용한 비대칭 누설모드 변조기 [7]

비대칭 누설모드 변조기는 50 Giga pixels/s 의 변조 능력이 있기 때문에 DMD SLM 이나 LCoS SLM 보다 10배 많은 정보를 표시할 수 있다. 또한 <그림 11>에서 보듯이 픽셀화 되어 있지 않기 때문에 고차항의 회절 특성이 나타나지 않으며 도파관의 비대칭성 때문에 공액상 (conjugate image) 도 나타나지 않는다.

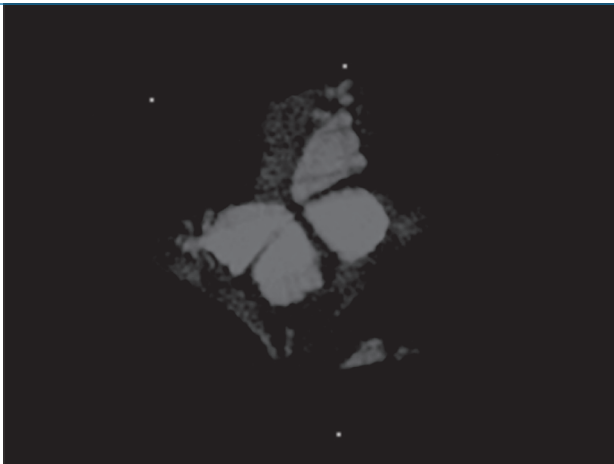


그림 11. 비대칭 누설모드 변조기로 생성된 3차원상 [7]

또한 비대칭 누설모드 변조기는 빛의 입사각이 매우 크기 때문에 <그림 12>에서 보듯이 회절각이 크게 나타난다. 따라서 0 차 항을 분리하여 관찰하는 것이 가능해 진다.

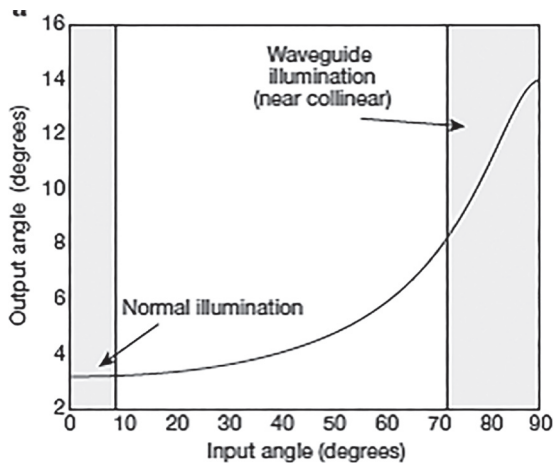


그림 12. 비대칭 누설모드 변조기의 입사각에 따라 출사각 관계 [7]

음향광학 변조기는 진행하는 음파를 사용하기 때문에 디지털 홀로그래피를 위해서는 부피가 큰 다면회전경 (Rotating Polygon Mirror) 과 보상 광학계가 필요하다는 단점이 있다.

### 1.2 OASLM

OASLM 의 앞면 또는 뒷면에 빛을 비추면 OASLM 내부에서 변화가 일어나서 정보를 기록하게 된다. OASLM 도 음향광학 변조기처럼 픽셀화 되어있지 않기 때문에 연속적인 변조가 가능하다는 장점이 있다. OASLM 에 사용되는 물질로 할로겐화은 (Silver halide), 포토폴리머 (photopolymer), 광굴절 (photorefractive) 물질 등을 사용할 수 있다 [8]. 그러나 동적 OASLM 을 개발하기 위해서는 빠른 동작 속도가 필요하여 최근에는 광굴절 물질에 대한 개발이 이루어져 왔다.

<그림 13>는 광굴절물질을 사용한 OASLM 의 시간에 따른 회절 효율 변화를 나타낸 것이다. 동적 광굴절 물질은 ITO가 코팅된 유리 사이에 채워지고 ITO 양단에는 전압이 걸리게 된다. 펄스레이저가 입사하면 광굴절 물질의 굴절율이 시간에 따라 변하면서 OASLM 의 회절효율이1% 가까이 증가하게 된다.

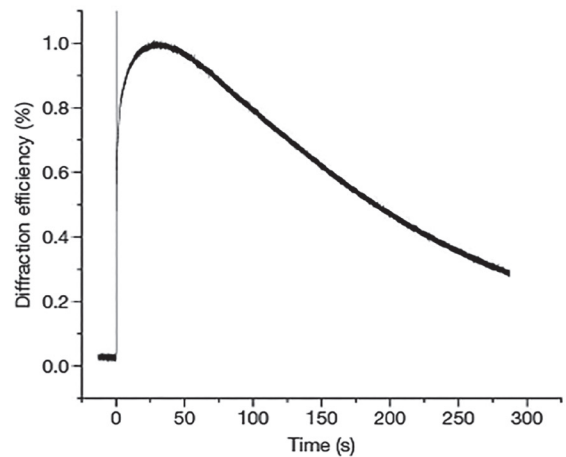


그림 13. 광굴절물질의 시간에 따른 회절 효율 변화 특성 [8]

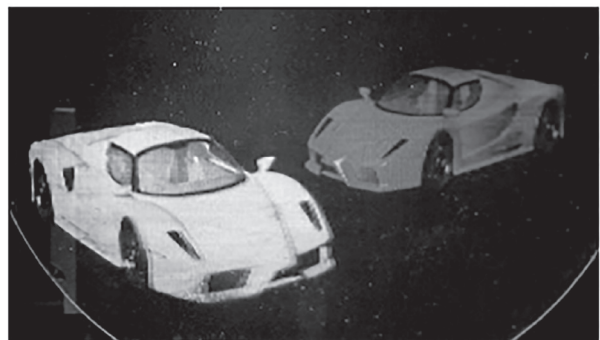


그림 14. 광굴절물질을 이용한 OASLM 의 컬러 홀로그램 [8]

광굴절물질을 이용한 OASLM 은 컬러를 표시하기 위해서 입사하는 빛의 각도를 다르게 해서 R,G,B 를 기록 한 후 R, G, B LED 3개를 이용하여 재생하면 된다. <그림 14>은 이와 같이 재생된 컬러홀로그래프의 3차원 상이다.

OASLM 은 대면적 구현에는 효과적이나 최소 픽셀 피치는 OASLM 을 구동하는 EASLM 의 피치와 광학계에 좌우되기 때문에 현재는 홀로그래픽 스테레오그래피 (Holographic stereography) 에 적용되고 있다.

## 2. 픽셀 피치 1 μm 이하 SLM 개발 현황

픽셀피치를 1 μm 이하로 만들기 위한 여러 가지 시도 중 IMEC 의 MEMS 기술을 이용하는 방법과 NHK 의 Giant Magnetoresistance (GMR) 을 이용하는 방법, 그리고 Cambridge 대학에서 발표한 CNT를 이용한 기술을 소개한다.

### 2.1 IMEC 의 MEMS 기술

IMEC 에서는 DMD 와 같은 MEMS 기술을 이용하여 픽셀 피치 1 μm 이하의 SLM 을 만들려는 프로젝트를 수행하고 있다 [9,10]. 동작 원리는 Micromirror반사판의 높이를 전압에 따라 변화도록 만들어 빛의 위상을 변화시키려는 것이다. 이때, 기존의 Si MEMS가 아닌 SiGe 기반의 MEMS 기술을 사용하여 미세화를 꾀하고 있어 NEMS (Nano-Electro-Mechanical-Systems)로 명명하고 있다. <그림 15>는 0.5 μm 픽셀 피치를 이용한 정적 홀로그래프의 구조 및 3차원 상을 나타내고 있으며 픽셀간의 높이 차가 있는 것을 알 수 있다. 하지만 아직 동적 홀로그래프는 성공하지 못했으며 시제품으로 픽셀간의 높이 차가 50 nm 만큼 변하고, 픽셀 피치는 1.5 μm 인 SLM 를 만들려고 하고 있다[9].

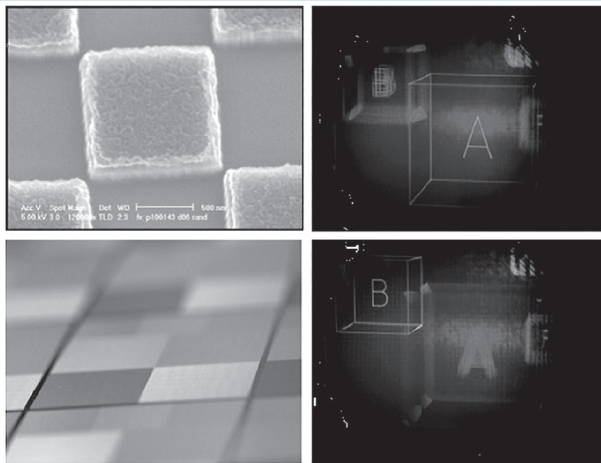


그림 15. IMEC 의 0.5 μm 픽셀 피치를 이용한 정적 홀로그래프의 구조 및 3차원 상 [10]

### 2.2 NHK 의 GMR 기술

NHK 에서는 GMR 특성을 이용하여 1 μm 픽셀 피치의 SLM 을 만들었다[11]. 동작 원리는 강자성체의 자화 방향에 따라 진행하는 빛의 편광방향이 틀어지는 Faraday 효과를 사용하였다 [12]. <그림 16>은 1 μm 픽셀 피치를 이용한 정적 홀로그래프 구조 및 재생방법을 나타내는 것으로 기준픽셀의 자화 방향은 일정하게 하고 변조픽셀의 자화방향만을 외부 자기장에 따라 변화시켜 빛의 편광 방향이 돌아가는 정도를 픽셀 마다 다르게 하는 것이다. 이때 빛의 편광이 회전하는 각도는 0.10로 매우 작기 때문에 홀로그래프를 관찰하기 위해서는 2개의 편광판이 필요하다. 동적 홀로그래프에서는 외부 자기장 대신 STS (Spin Transfer Switching) 을 사용할 계획이지만 아직 성공하지 못했다.

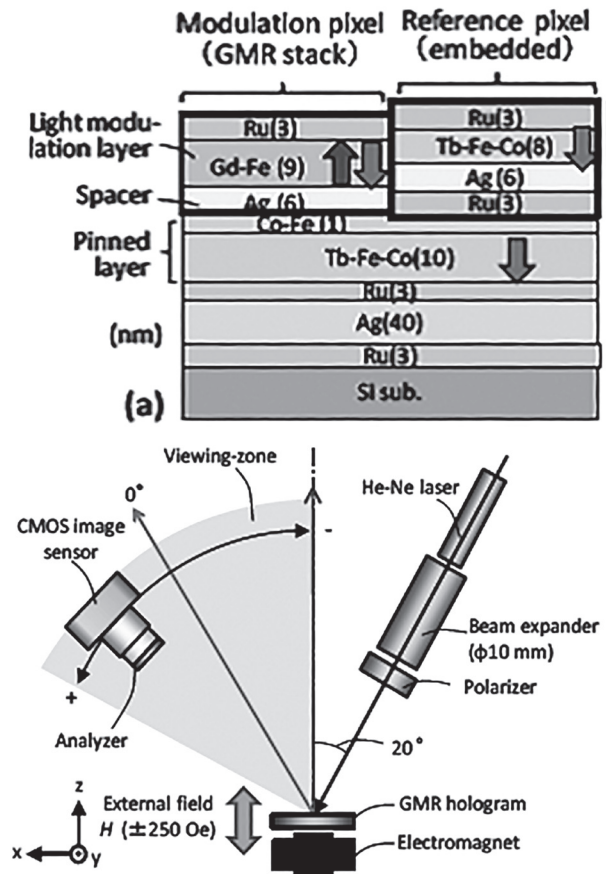


그림 16. NHK 의 GMR 을 이용한 정적 홀로그래프 구조 및 재생 방법 [11]

### 2.3 Cambridge 대학의 CNT 기술

Cambridge 대학에서는 400nm의 pitch로 MWCNT (Multi-Wall Carbon NanoTube)를 성장시키고 이러한 MWCNT Array의 Diffraction 패턴을 이용하여 홀로그래프 Image를 구현하는 실험에 성공하였다[13]. 이 기술은 정적인 이미지를 구현

하는데 그치긴 하였지만, Nano 기술을 홀로그램용 SLM 기술에 도입하였다는데 큰 의미가 있으며, 향후 이러한 Nano 선이나 Nano particle를 이용한 변조 가능한 미세 패턴제작 연구의 시초가 될 것으로 기대된다.

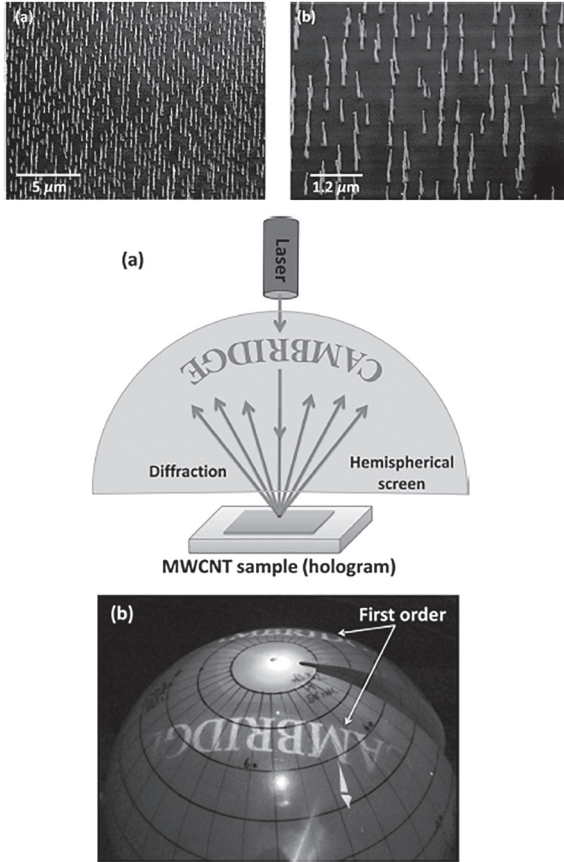


그림 17. Cambridge사에 MWCNT를 이용한 정적 홀로그램 구조 및 재생 결과 [13]

### 3. Complex 변조 SLM

이제까지 소개된 SLM (DMD, LCoS, ...) 은 빛의 세기 또는 빛의 위상만을 변조시키는 한계가 있다. 그러나 이상적인 SLM 은 빛의 진폭과 위상을 동시에 제어하는 Complex 변조 SLM 으로 회절효율 특성이 우수하고 0차 상이나 공액 상이 나타나지 않는 장점이 있다 [14]. <그림 18>은 하나의 위상 변조 SLM 의 전체 픽셀을 2부분으로 나누어 복소 변조 SLM 을 만드는 구조를 나타낸다.

TE 편광 된 빛은 위상 변조 SLM 에 의해 위상이 변조된다. 다음 구조화 된 반파장판(Half-wave plate)를 지나면서 짝수 열을 지난 빛만 편광방향이 TM 으로 바뀌게 된다. 이후 위상 감응 요소 (Phase sensitive component) 를 지나면서 2개의 편광특성을 가진 빛이 결합하게 되고 45도 편광판을 지나면서

간섭효과가 나타나게 된다. 복소 변조하는 공식은 아래와 같고 2개의 위상변조 SLM 의 합으로 복소변조 SLM 을 표현할 수 있음을 알 수 있다.

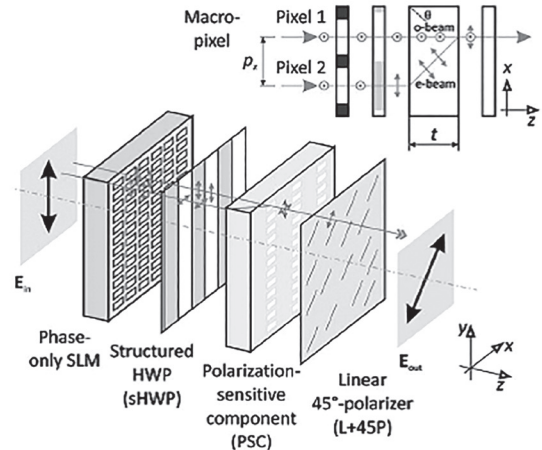


그림 18. 복소변조 SLM 을 만드는 구조 [14]

## V. 결론

지금까지 살펴본 바와 같이, 현재까지 상용화된 DMD SLM 과 LCoS SLM 의 경우에는 충분히 작은 픽셀피치를 구현하지 못하고 있으며, 픽셀화 되지 않은 SLM 인 음향 광학 변조기 및 OASLM 의 경우에도 양질의 화질을 얻기 위한 픽셀 피치 구현에 어려움이 있다. 현재까지 개발된 셀 피치 1 μm 이하 SLM 의 경우에는 동영상 구현, 대면적 적용성을 확보하기 위하여 많은 기술적 난관을 극복해야 할 것으로 예상된다. 현재까지는 이러한 SLM 의 한계를 홀로그램 디스플레이 시스템의 구성으로 이용하여 일부 해결하고 있지만, 근본적으로 초고해상도 대면적 SLM 의 개발 없이는 본격적인 디지털 홀로그래피의 구성은 어렵다고 생각된다.

양안 시차 3D 의 경우에도 최근 급속한 발전을 이룬 평판 디스플레이 기술의 발전으로 지금까지 구현이 어렵던 기술들이 구현이 되고 있는 것처럼, 미세화 대면적화가 활발히 진행되고 있는 디스플레이 기술 추세를 본다면 가까운 미래에 초해상도 대면적 SLM 의 개발도 가능할 것으로 생각된다. 특히, 초고해상도 대면적 디스플레이를 지향하는 디지털 홀로그래피용 SLM 기술은 기존의 디스플레이 기술을 뛰어넘는 혁신적인 디스플레이 기술이 요구되므로 홀로그래피 이외 분야에도 활용이 가능한 많은 부산물이 나올 것으로 예측된다. 다만, 이러한 원천 기술의 개발을 위해서는 산학연과 정부의 지속적인 협력과 관심이 요구된다고 하겠다.

## Acknowledgement

본 연구는 미래창조과학부 ‘범부처 Giga KOREA 사업’의 일환으로 수행하였음. [GK13D0100, 디지털 홀로그래픽 테이블 탑형 단말 기술 개발]

## 참고 문헌

[1] J. Hahn, H. Kim, Y. Lim, G. Park, and B. Lee, “Wide viewing angle dynamic holographic stereogram with a curved array of spatial light modulators,” *Opt. Express*, Vol. 16, No. 16, pp.12372–12386, 2008.

[2] <http://www.ti.com/lit/an/dlpa008a/dlpa008a.pdf>

[3] W. P. Bleha, and L. A. Lei, “Advances in Liquid Crystal on Silicon (LCoS) Spatial Light Modulator Technology,” *Proc. SPIE*, Vol. 8736, p. 87360A, 2013.

[4] S. Reichelt, “Spatially resolved phase-response calibration of liquid-crystal-based spatial light modulators,” *Appl. Opt.*, Vol. 52, no. 12, pp. 2610–2618, 2013.

[5] R. Sterling, “JVC D-ILA high resolution, high contrast projectors and application,” *Proceedings of the 2008 Workshop on Immersive Projection Technologies/Emerging Display Technologies*, ACM, NewYork, USA, pp. 10:1–10:6, 2008.

[6] <http://holoeye.com/spatial-light-modulators/le-to-phase-only-spatial-light-modulator/>

[7] D. E. Smalley, Q. Y. Smithwick, V. M. Bove Jr., J. Barabas, and S. Jolly, “Anisotropic leaky-mode modulator for holographic video displays,” *Nature*, Vol. 498, pp. 313–318, 2013.

[8] P. A. Blanche, A. Bablumian, R. Voorakaranam, C. Christenson, W. Lin, T. Gu, D. Flores, P. Wang, W. Y. Hsieh, M. Kathaperumal, B. Rachwal, O. Sidiqui, J. Thomas, R. A. Norwood, M. Yamamoto, and N. Peyghambarian, “Holographic three dimensional telepresence using large area photorefractive polymer,” *Nature*, Vol. 80, pp. 80–83, 2010.

[9] R. Stahl, V. Rochus, X. Rottenberg, S. Cosemans, L. Haspelslagh, S. Severi, G. V. Plas, G. Lafruit, and S. Donnay, “Modular sub-wavelength diffractive light modulator for high-definition holographic displays,” *J. Phys.*, Vol. 415, p. 012057, 2013.

[10] R. Stahl, and M. Jayapala, “Holographic displays and smart lenses,” *Optik & Photonik*, Vol. 6, no. 2, pp.

39–42, 2011.

[11] K. Machida, D. Kato, T. Mishina, H. Kinjo, K. Aoshima, K. Kuga, H. Kikuchi, and N. Shimidzu, “Three-Dimensional Image Reconstruction with a Wide Viewing-Zone-Angle Using a GMR-Based Hologram,” in *Proceedings of Digital Holography and 3D Imaging*, OSA Technical Digest, Dth2A.5, 2013.

[12] E. Hecht, *Optics*: Addison-Wesley Publishing Company, 1989.

[13] H. Butt, Y. Montelongo, T. Butler, R. Rajesekharan, Q. Dai, S. G. Shiva-Reddy, T. D. Wilkinson, and G. A. J. Amaratunga, “Carbon Nanotube Based High Resolution Holograms,” *Adv. Mater.*, vol 24, pp OP331–OP336, 2012.

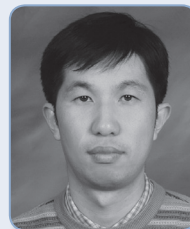
[14] S. Reichelt, R. Haussler, G. Futterer, N. Leister, H. Kato, N. Usukura, and Y. Kanbayashi, “Full-range, complex spatial light modulator for real-time holography,” *Opt. Lett.*, vol. 37, pp. 1955–1957, 2012.

## 약력



김용해

1991년 한국과학기술원 이학사  
 1993년 한국과학기술원 물리학 석사  
 1997년 한국과학기술원 물리학 박사  
 1997년~2001년 하이닉스 반도체 선임연구원  
 2011년~현재 한국전자통신연구원 책임연구원  
 관심분야: SLM, 3D 디스플레이, 3D 프린팅,  
 무선 전력 전송, 플렉시블 디스플레이



황치선

1991년 서울대학교 물리학과 학사  
 1993년 KAIST 물리학과 석사  
 1996년 KAIST 물리학과 박사  
 1996년~2000년 현대전자 메모리 연구소 차장  
 2000년~현재 한국전자통신연구원 부품소재연구소  
 책임연구원  
 관심분야: 산화물TFT, AMOLED, 투명 디스플레이,  
 SLM



추혜용

1987년 경북대학교 물리학과 학사  
 1989년 경북대학교 물리학과 석사  
 2008년 경북대학교 정보디스플레이학 박사  
 1989년~현재 한국전자통신연구원 부품소재연구소  
 책임연구원  
 관심분야: OLED, 반사형 디스플레이,  
 스트레처블 디스플레이, 홀로그래피