

THz 대역 소자의 개발 동향 및 MEMS 기술의 접목

정기훈 · 박상길 ·
박현철 · 김재준
한국과학기술원

I. 서 론

전자기파 대역에서 광주파수와 고주파수 대역을 연결하는 THz 대역은 광원과 감지기 선택의 제한으로 많이 연구가 진행되어 오고 있지 못한 실정이다. 1980년대 초단파 레이저를 이용한 PCA의 등장으로 THz의 간격을 좁히는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나, 현재 보고된 THz 대역 소자는 THz 시스템 상용화를 위해 아직 고성능화, 소형화, 경량화 및 집적 패키징 기술이 부족한 실정이다.

고급 나노마이크로 공정 기술을 응용한 미세 기전 시스템(MEMS: Microelectromechanical System) 제작기술은 기술 지난 20여년간 큰 관심을 받아 오며 성장해 왔다. 기존 반도체 공정과는 달리 실리콘, 고분자, 나노 입자 등 다양한 재료로 구성된 미세 구조물의 구동 기술, 3차원 구조 제작 기술, 웨이퍼의 상하단을 수 마이크론의 오차 이내에서 정렬시키는 기술, 미세 센서와 구동기를 동일한 기판 위에 같이 제작하는 집적화 기술 및 다양한 패키징 기술 등 MEMS 기술을 이용한 전기, 기계, 바이오, 광학 응용을 위한 미세 기전 시스템들이 개발되어 왔다. 광학용 미세 시스템 관련 MEMS 기술을 소개하고, 이를 통한 전자기파의 전체 영역을 연결하는 THz 대역에 적용성을 검토하고자 한다.

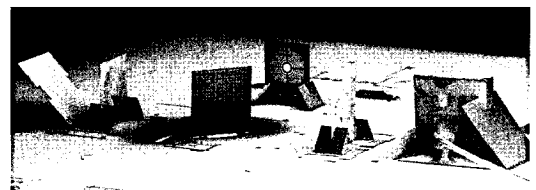
II. 미세 광기전 소자용 MEMS 기술

MEMS 기술을 이용한 미세 광학 시스템(MOEMS:

Micro-Opto-Electro-Mechanical System)을 통해 광학 신호의 측정 및 제어에 관한 기술이 최근 15년간 활발히 진행되어 오고 있다. MOEMS기술은 90년대 중반 광통신 분야에 관한 연구로부터 최근 바이오포토닉스 분야 연구로 적용 분야가 확대되고 있다([그림 1]). 실리콘 계열의 단결정 실리콘막(Si), 실리콘 산화막(SiO₂), 실리콘 질화막(Si₃N₄)을 비롯하여 다양한 고분자 박막층 등을 이용한 미세 공정 기술을 바탕으로 미세 거울 어레이(DMD: Digital Mirror Device), 레이저 스캐닝용 미세 구동 거울, 광스위치, 광결합기, 가변 VCSEL, 마이크로블로메터, 초소형 가변 초점 렌즈 등 다양한 미세 광학 소자 개발에 관한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 현재, MOEMS 분야에서 가장 활발히 활용되고 있는 MEMS 공정 기술은 아래와 같다.

2-1 MEMS 구동 기술

MEMS 기술을 이용한 미세 구조의 동적 구동은 기판 평면에 대해 수평 운동(lateral motion), 수직 운동(piston motion) 및 각운동(angular motion) 등 다양



[그림 1] MEMS 기술을 이용한 미세 광학 시스템^[1]

본 연구는 지식경제부(KI 001889)와 교육과학기술부(NRF 2010-0000210, NRF 2010-0017693)의 지원으로 수행되었습니다.

한 구동 방향을 설계할 수 있다. 렌즈, 거울, 광섬유 등은 MEMS 구동 기술과 접목되어 다양한 스케닝 및 광스위치 역할이 가능하다. 구동 방식은 구동 원리에 따라 정전기 방식, 전자기 방식, 전열 방식, 유압식으로 구분된다.

정전기력은 전력 소모가 거의 없는 장점을 갖고 있으나, 고전압 밀도를 요구하기 때문에 정전극(stationary comb electrodes)과 동전극(moving electrodes) 간에 높은 전압 밀도를 요구하기 때문에 고전압차 또는 미세 간격을 갖는 전극 어레이로 설계해야 하는 제한이 있다. 정전기력 구동 방식은 전극의 설계에 따라 수평 운동, 수직 운동 및 각운동 등 다양한 구동 방향을 구현할 수 있다. 특히, 정전기력을 이용한 구동 방식은 고속 구동 능력이 우수하여 미세렌즈의 고속 스케닝에 적용될 수 있다^[2].

전자기력을 이용한 구동 방식은 미세 자석의 제작공정이 가장 중요하다. 전자기력은 소자의 크기가 작아짐에 따라 확보할 수 있는 장점이 정전기력에 대해 약하나, 밀리미터 스케일의 구동 소자의 경우, 정전기력에 비해 고출력 구동을 구현할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나, 소자의 크기가 수 밀리미터인 경우 상용 전자석의 집적이 가능하여, 비교적 넓은 면적의 미세 거울 구동에 정전기력보다 우수하다^[3]. 정전기력이나 전자석 방식은 전력 소모가 거의 없으므로 저전력 구동의 큰 장점을 가지고 있다.

전열 방식은 열 팽창률이 다른 이형 재료로 제작된 미세 외팔보(microcantilever) 구조의 변형을 이용한 구동 방식이다. 그 외팔보 구조 상단에 구성된 미세 전선을 통해 전류를 흘리면, 전선 주변에 Joule 열이 발생한다. 외팔보내 이형 재료의 열팽창 계수의 큰 차이로 인해 이면(out-of-plane) 운동을 발생시킨다. 전열 방식에 의한 구동은 앞서 소개한 구동 방식에 비해 전력 소모가 크지만, 수~수백 mW 정도의 비교적 낮은 전력 소모로 고출력 및 고변위를 갖는 구동을 확보할 수 있는 장점을 가지고 있다^[4]. 그러나

전선의 냉각 속도가 반복 구동을 결정함으로써, 수 kHz 이상의 고속 구동에 적용하기에 한계가 존재한다.

유압을 이용한 미세 소자의 구동도 가능하다. 실리콘계의 박막과는 달리 고분자 박막은 수 kPa 정도의 압력차에 의해 민감하게 반응한다. 미세 유체 채널을 이용한 유압차의 인가를 통하여 박막의 변형이 가능하다^[5].

2-2 3차원 구조 제작 기술

MOEMS 응용을 위한 3차원 제작 기술로 DRIE (Deep Reactive Ion Etching) 공정과 다층 노광법이 일반적으로 사용된다. DRIE 공정은 실리콘 건식 식각과 고분자 보호막 증착을 수 초 이내에 반복적으로 수행함으로써, 20:1 이상의 종횡비가 매우 높은 실리콘 구조물의 제작이 가능하다. 실리콘 DRIE시 포토레지스트나 실리콘 이산화막을 이용하여 50~100:1 이상의 높은 식각 선택비를 구현할 수 있다. 특히, SOI (Silicon On Insulator)와 같은 기판을 이용하여 고종횡비를 갖는 단결정 실리콘으로 이루어진 비교적 면적이 넓은 미세 거울 제작이 가능하다^[6]. 또한, 식각된 경사면의 각도를 공정 조건에 따라 $\pm 10^\circ$ 정도에서 다양하게 조절이 가능하다. 또한, 고분자 보호막 증착없이 실리콘의 등방성 건식 식각을 구현할 수 있어, 다양한 곡률과 팁어레이 형태의 미세 광학 소자 제작이 가능하다.

에폭시계 음각 포토레지스트(negative photoresist)를 이용한 다층 고종횡비를 갖는 패턴의 제작이 가능하다. 일반적으로 Microchem사의 SU-8이 많이 사용되는데, 에폭시계 비교적 장고리(long chain)를 갖는 포토레지스트는 자외선 광경화(photopolymerization)후 점도(viscosity) 조절을 위해 사용되 용해제(solvent)에 의해 용해되지 않는다. 따라서, 패턴의 적층이 가능하며, 다양한 3차원 고분자 구조물의 제작이 가능하다. 이러한 고분자 구조는 3차원 고분자 포토닉 구조로 사용될 수 있을 뿐만 아니라, 다른 고

분자 재료로의 몰딩 공정 또는 LIGA 공정을 위한 템플렛으로 사용이 가능하다. 특히 LIGA 공정은 고분자 템플렛의 구조를 극성이 반대인 금속 구조물 구조를 형성하기 위해 가장 효과적인 방법으로 알려져 있다^[7].

2.3 양면 공정 기술

웨이퍼의 양면 패턴 정렬을 위해 크게 두가지 방법이 사용된다. 일반적으로 적외선을 이용한 이미징 기법과 이미지 캡처를 이용한 방법이 사용된다. 적외선 카메라를 이용한 방법은 패턴 정렬을 위한 분해능이 일반 가시광을 사용하는 패턴 정렬 분해능보다 1.5배 이상 떨어지므로, 고정밀도의 패턴 정렬을 얻기가 힘들다. 그에 비해 이미징 캡처 방식은 높은 정렬도를 얻을 수 있으나, 웨이퍼의 곡률에 의한 오차를 피하기 어렵다. 웨이퍼의 반경이 커짐에 따라 웨이퍼의 두께가 증가하는데, 두꺼운 기판을 사용할수록 양면 패턴의 오차를 줄이기 힘들다. 그러나 수마이크로 이내의 정렬 오차를 갖는 양면 패턴 제작은 물론 노광 공정에 의해 제작된 포토레지스트를 기반으로 3차원 구조물을 양면에 제작하는 것이 가능하다.

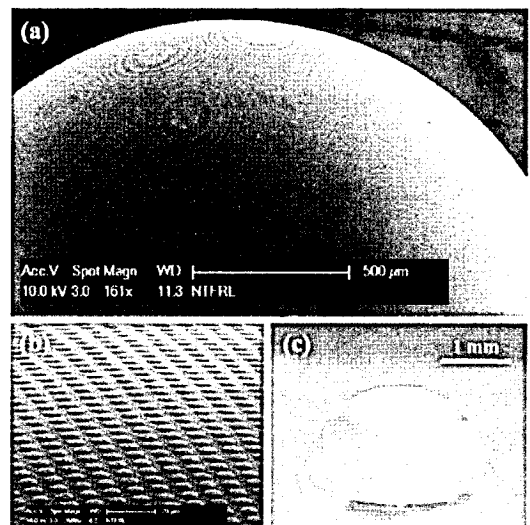
2.4 미세 몰딩 기술

고분자 재료를 이용한 미세 몰딩 기술이 지난 10여년간 활발히 진행되어 왔다. 실리콘 또는 글라스로 만들어진 미세 템플렛을 이용하여 다양한 고분자 재료를 이용한 몰딩이 이루어진다. 특히, 광학 소자를 위한 미세 몰딩 기술이 최근 발표되고 있는 실정이다. PDMS(Polymethylsiloxane)나 투명 에폭시는 가시광선 내 투과성이 우수하여, 광학 소자 응용이 기대된다. 미세 몰딩 기술의 큰 장점 중의 하나는 미세 패턴과 밀리미터 크기의 패턴을 동시에 제작이 가능하다는 장점이 있다. 예를 들어 미세 패턴을 갖는 반구형 렌즈나 곤충 눈 구조를 모사한 렌즈의 제작이

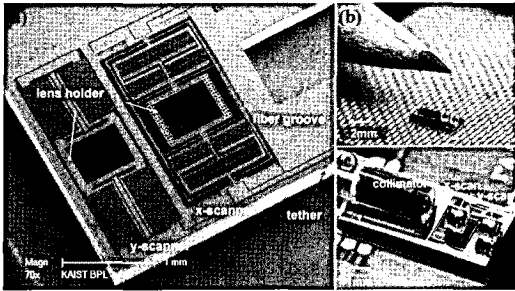
대표적이다. 또한 미세 몰딩시 3차원 마스터를 유연성 고분자 재료를 이용하면, 다양한 3차원 곡면을 갖는 구조의 마스터 템플렛이 가능하다([그림 2]).

2.5 미세 광학 벤치

미세 광학 벤치란 미세 광학 소자를 이용한 광학 시스템을 실리콘 칩위에 구현할 수 있도록 돕는 미세 구조물을 일컫는다. 포토리소그래피에 의해 미세 광학 소자는 실리콘 웨이퍼와 같이 기판 위에 고정밀도를 갖고 제작이 가능하다. 미세 광학 벤치와 더불어 사용되는 구조는 렌즈를 정렬을 보조하는 렌즈 홀더, 광섬유를 정렬 보조를 위한 광섬유 그루브(groove), 미세 거울 소자를 바로 연결시킬 수 있는 미세 구멍 등으로 나눌 수 있다([그림 3]). 광통신 응용을 위해 MEMS 기술을 이용한 다양한 미세 광학 벤치 제작 기술이 보고되었다^[10]. 특히, 광섬유 연결을 위해 마이크로힌지를 이용한 미세 소자의 직립 구조 제작은 MEMS 기술 중 표면 미세 가공법(surface micromachining) 기법을 이용하여 구현이 가능하다. 마이크



[그림 2] 변형 고분자 템플렛을 이용한 미세 패턴을 갖는 LED용 렌즈^[8]



[그림 3] 레이저 스캐닝용 미세 광학 벤치^[9]

로힌지는 총 3장의 포토마스크를 사용하여 제작되고, 구조물의 제작 후 식각 작업을 통해 보호막의 식각을 통해 마이크로힌지 구조물을 부분적으로 기관에서 분리시킨다. 이후 고정자를 이용하여 미세 끼워 맞춤을 통해 웨이퍼 기관 위에 다양한 소자를 제작할 수 있다.

III. THz 대역 소자 기술 및 MEMS 기술의 응용

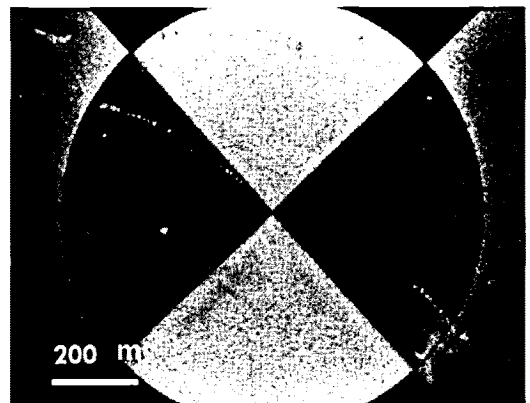
THz 대역 소자는 발생 소자, 감지 소자, 렌즈, 필터 및 스위칭 소자 등으로 크게 구분할 수 있다. 발생 소자와 감지 소자의 제작 기술의 발전은 THz 대역 측정 기술 발전에 크게 기여하고 있다. 최근 메타물질을 이용한 능동 소자의 개발이 큰 관심을 받고 있다. 각 분야별 소자의 개발 동향 및 MEMS 기술의 응용가능성을 알아보려고 한다.

3-1 THz파 생성 소자

THz파 기술은 믿을 만한 THz 광원 소자의 개발과 함께 발전되어 왔다. THz 광원은 크게 연속파와 펄스파로 나눌 수 있다. 연속파를 생성하는 전통적인 방법은 자유 전자 레이저(free electron laser)를 이용하는 방법으로 다른 광원에 비해 높은 출력과 자유롭게 파장을 선택할 수 있는 장점을 가지지만, 거대한 설비가 필요로 하기 때문에 기업이나 연구소에서 운영하기 힘들다는 단점이 있다. 따라서 초단파 레이

저에 의한 여기를 이용해 광전도 안테나(PCA: Photoconductive Antenna)나 비선형 광결정에서 펄스파 생성 방식이 가장 일반적으로 사용된다^[11].

광전도 안테나는 초단파 레이저에 의해 반도체 표면에 여기된 전자 홀쌍(electron-hole pair)이 안테나에 걸린 바이어스 전압을 따라 서브피코초의 광전류를 생성하고, Maxwell 방정식에 따라 THz 펄스파 생성을 유도한다. 이때 생성되는 THz 펄스파는 반도체 표면에 형성된 안테나 형상에 따라 특성이 변하게 된다. 안테나 형태의 경우, 쌍극자(dipole) 형태^[12], 나비넥타이(bow-tie) 형태^[13], 동면 스트립 라인^[14] 형태 등이 있다. 일반적으로 나비 넥타이 안테나는 쌍극자 안테나에 비해 저주파수에서 높은 출력을 보이지만, 대역폭이 좁다. 한편, 광전도 안테나 등 초단파 레이저를 사용한 생성 소자들은 광전도 효율이 낮아 저출력 THz 파 생성 소자로 보고되고 있다. 최근 빗살형 전극어레이는 각각의 동면 스트립 라인 안테나 간에 발생하는 THz 파의 보강 간섭 효과를 이용하여 출력을 크게 향상시킬 수 있다^[15]. 또한, 안테나 형상은 일반적으로 저온 성장 GaAs 박막 위에 형성되는데, Si-GaAs에 비해 극초단파 포화 광도가 높은 특성때문에 고효율 THz 생성에 이용된다.



[그림 4] 나노플라즈모닉 패턴을 갖는 고효율 THz 광전도 안테나^[16]

비선형 광결정에 의한 THz 생성 방법은 광정류법, 차주파수법, 파라메트릭 발진기 등이 있다. 비선형 광결정체는 GaAs, GaSe, GaP, ZnTe, CdTe 및 유기체인 DAST, LiNbO₃, LiTaO₃ 등이 사용되고 있으며, 이중 ZnTe 결정이 화학적으로 안정하고, 비교적 큰 전기광학계수를 가지고 있어 대부분의 시스템에서 ZnTe 결정을 사용한다. 광정류 방법은 광전도 안테나에 비해 효율이 낮으나, 수 THz의 대역폭을 가지는 광전도 안테나에 비해 50 THz에 이르는 초광대역 주파수까지 생성할 수 있는 장점을 갖고 있다.

광전도 안테나와 비선형 광학을 이용한 THz 생성 소자는 광학주파수와 THz 사이의 경계영역을 담당하고 있고, MEMS 기술을 응용한 다양한 3차원 플라즈모닉 구조 어레이를 통해 광전도 효율의 증가가 기대된다(그림 4).

3-2 THz 렌즈

THz 렌즈는 THz의 발생기와 검출기에 사용되어 THz파의 발생과 검출 효율을 높이기 위해 일반적으로 활용된다^[17]. GaAs 기반 광전도 안테나를 이용한 THz 파 생성시 GaAs 기관과 대기 간의 세 배 이상의 굴절률 차이로 생성파의 대부분은 전반사로 인해 출력 손실을 갖는다. 이러한 현상을 극복하기 위해 실리콘으로 제작된 고체 침지 렌즈(SIL: Solid Immersion Lens)를 사용하여 전반사를 줄이고, 출력을 향상시킬 수 있다. 평면 광결정(photonic crystal) 구조로 구성된 렌즈는 THz 도파로(waveguide)와의 저손실 광결합(coupling) 소자로 최근 활용되고 있다^[18]. 평면 광결정(photonic crystal) 구조는 유효 굴절률 변화를 통해 THz 도파로에 입사가 가능하다. 또한, 메타물질을 이용한 THz용 렌즈 제작 기술도 보고되었다^[19]. 본 기술은 최근 관심이 증가하는 THz 기반 통신기술을 위한 저손실 기초 소자로서의 MEMS 구동 기술과 접목하여 능동소자로서의 개발이 가능할 것으로 기대된다.

3-3 THz 필터 및 스위칭 소자

THz 대역 능동형 기능 소자 개발을 위한 다양한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다. 음 굴절률(negative index)을 갖는 메타 물질을 이용해 특정 주파수에서만 공진을 유도하여 능동형 기능 소자를 개발하고자 하는 시도가 활발히 진행되고 있고, THz 대역내 파장 이하(sub-wavelength)를 갖는 3차원 구조 어레이 제작을 위한 MEMS 기술의 적용이 기대된다. THz 대역의 메타 물질은 자유 전자 운반자를 가지는 반도체 기관 위에 유전율(electrical permittivity)이나 자화율(magnetic permeability)의 공진을 유도하는 금이나 구리와 같은 전도성 높은 금속을 패터닝하여 전자의 진동에 의한 전자기파의 변화를 유도한다. 특히, 인덕터를 이루는 두 개의 루프형 구조가 캐패시터를 이루게끔 일정 간격으로 분리되어 있는 개방 루프형 형상이 주로 사용된다. 이 때, 외부적 자극을 통해 반도체 기관의 특성이나 메타 물질의 형상을 변화시킴으로써 주파수 특성을 변화시킬 수 있다. 외부 전기장을 인가하거나^[20], 쇼키 다이오드를 이루는 기관에 인가 전압을 변화시켜 메타 물질 사이 기관의 전도성을 변화시키거나^[21], 온도를 변화시켜 기관의 자유 전자 운반자의 밀도^[22] 등 반도체 기관의 특성을 변화시킴으로써 THz파의 투과를 조절할 수 있음이 보고되었다. 최근에는 펄스 빔의 파워나 여기 시간을 조절함으로써 광학적 방법을 이용하여 보다 빠른 속도로 THz파의 스위칭이 가능하게 되었다^[23]. 한편, 외부 자극에 의한 기관의 특성 변화뿐 아니라 서로 다른 열팽창 계수를 갖는 두 개의 물질로 이루어진 Bimorph 구동기를 이용하여 메타 물질의 형상을 변화시켜 THz파 입사각을 조절함으로써 THz파의 변조가 가능함이 보고되었다^[24]. 이러한 방법은 전기적 광학적 방법에 비해 속도가 느리다는 단점이 있으나, 기관의 특성에 의존하지 않고 기계적인 방법을 통하여 THz파의 제어 가능하다는데 의의가 있다. MEMS 기술은 다양한 기관 위에 메타물질의 패터닝뿐 아니라, THz파의

세기, 위상, 편광 등의 변조를 위한 다양한 능동형 기능 소자 개발에 응용될 수 있을 것으로 기대되며, 근거리 광통신을 위한 THz파 변조기, 스위치, 필터, 커넥터 등에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

3-4 THz파 감지 소자

THz 영역에서는 THz 광원의 세기에 비해 상대적으로 높은 세기의 열잡음(thermal background)이 포함되어 있기 때문에 고감도의 검출 방법이 필요하다. THz 시간 영역 분광 시스템에 대한 연구는 1990년대부터 진행되어 왔으며, 지금은 저온 증착된 GaAs기판을 사용한 광전도 안테나를 통한 측정이 일반적이다. 광전도 안테나에 DC 바이어스 전압 대신 전류계를 연결하고, 검출용 초단파 레이저에 의해 발생된 전자 홀쌍이 THz 펄스파에 의해 전극으로 이동할 때 흐르는 전류를 측정하여 THz 전기장의 세기를 측정한다. 이때 검출용 초단파 레이저의 광경로차를 조절하여 THz 펄스파의 시간폭형을 샘플링할 수 있다. 또한 광대역 시영역 측정을 위해 전광 샘플링(electro-optic sampling) 기법이 사용된다. 이는 전광 효과인 포켈 효과(Pockel's effect)를 사용하는 것으로 THz 전계의 세기에 따라 복굴절 물질의 굴절률 변화를 통해 검출용 빔의 편광 변화를 통해 THz 전계 세기를 측정한다. 광전도 안테나를 이용하는 방법에 비해 넓은 대역폭을 측정할 수 있다. GaSe 비선형 광결정과 10펨토초 레이저를 이용해 100 THz 영역에 이르는 영역을 측정할 수 있다^[25]. 비시간 영역에는 DTGs(Deuterated Triglycine Sulphate) 결정, 볼로미터, SBD 및 SIS(Superconductor-Insulator-Superconductor) 접합 방법들이 광범위하게 사용되고 있고, 최근 단일 전자 트랜지스터를 이용한 THz 단일 광자 검출기가 개발되었다^[26].

IV. 결 론

본 논문에서는 THz 영역의 소자 기술 동향을 살

펴보고, MEMS 기술을 통한 소자 개발의 가능성에 대해 살펴보았다. 현재 THz 소자에 적용되는 미세 공정 기술은 반도체 공정 기술로 구현된 경우가 대부분이나, 최근 20여년간 다양한 3차원 미세 구조물 제작 기술 및 미세 구동기 기술을 중추적으로 이끌어온 MEMS 기술의 적용은 보편화되지 못하고 있는 실정이다. 아직, THz 광원, 능동 필터, 수광 소자의 확보가 미약한 실정에서 MEMS 기술의 적용은 다양한 THz 고성능 THz 소자를 개발과 접목될 필요성이 매우 높을 것으로 기대된다. 더 나아가 THz를 이용한 바이오 센싱 및 바이오 이미징 소자 역시 고성능 THz 소자를 통한 연구 방향의 큰 원동력을 가지고 있다. 현재 KAIST와 한국표준과학연구원을 중심으로 개발되고 있는 MEMS 기반 THz 내시경 기술은 본 논문에서 서술한 3차원 MEMS 기술을 응용하여, 초소형 및 고성능 THz 소자 개발을 수행하고 있으며, THz 시간 영역 분광 기술을 바이오 분야에 적용하고자 하는 연구를 수행하고 있다. 또한, 이러한 소자는 THz 대역의 분광 측정 기술은 다수의 바이오 물질의 비표지(label-free) 검출을 위한 고성능 센서로의 이용될 예정이다. THz 대역 소자의 MEMS 기술의 응용은 소자의 안정화, 소형화 및 경량화를 통해 향후 THz 기반 바이오센서 및 이미징 시스템 기술 확보를 위한 중요한 다리 기술(bridge technology)로서의 큰 역할을 할 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] UC Berkeley Ming C. Wu 교수연구팀, <http://nanophotonics.eecs.berkeley.edu/>
- [2] S. Kwon, L. P. Lee, "Micromachined transmissive scanning confocal microscope", *Optics Letters*, vol. 29, no. 7, pp. 706-708, 2004.
- [3] H. Miyajima, N. Asaoka, T. Isokawa, M. Ogata, Y. Aoki, M. Imai, O. Fujimori, M. Katashiro, and K.

- Matsumoto, "A MEMS electromagnetic optical scanner for a commercial confocal laser scanning microscope", *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 12, no. 3, pp. 243-251, 2003.
- [4] L. Wu, H. Xie, "A large vertical displacement electrothermal bimorph microactuator with very small lateral shift", *Sensors and Actuators A: Physical*, 145-146, pp. 371-379, 2008.
- [5] K. H. Jeong, G. L. Liu, N. Chronis, and L. P. Lee, "Tunable microdoublet lens array", *Opt. Express*, vol. 12, pp. 2494-2500, 2004.
- [6] R. A. Conant, J. T. Nee, K. Y. Lau, and R. S. Muller, "A flat high-frequency scanning micromirror", *A Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Hilton Head Workshop*, 2000.
- [7] H. Lorenza, M. Despont, N. Fahrnia, J. Brugger, P. Vettiger, and P. Renaud, "High-aspect-ratio, ultrathick, negative-tone near-UV photoresist and its applications for MEMS", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 64, no. 1, pp. 33-39, 1998.
- [8] J. J. Kim, S. Chae, and K. H. Jeong, "Micropatterned single lens for wide-angle light-emitting diodes", *Optics Letters*, vol. 35, no. 6, pp. 823-825, 2010.
- [9] H. C. Park, C. Song, and K. H. Jeong, "Micromachined lens microstages for two-dimensional forward optical scanning", *Optics Express*, vol. 18, pp. 16133-16138, 2010.
- [10] M. C. Wu, "Micromachining for optical and optoelectronic systems", *Proceedings of The IEEE*, vol. 85, no. 11, pp. 1833-1856, 1997.
- [11] M. Tonouchi, "Cutting-edge terahertz technology", *Nature Photonics*, vol. 1, no. 2, pp. 97-105, 2007.
- [12] D. Grischkowsky, N. Katzenellenbogen, "Femtosecond pulses of terahertz radiation: Physics and applications", *OSA Proceedings on Picosecond Electronics and Optoelectronics* edited by G. Sollner and J. Shah, 9, pp. 9-14, 1991.
- [13] H. Harde, D. Grischkowsky, "Coherent transients excited by subpicosecond pulses of terahertz radiation", *Journal of Optical Society of America*, vol. 8, pp. 1642-1651, 1991.
- [14] N. Katzenellenbogen, D. Grischkowsky, "Efficient generation of 380 fs pulses of THz radiation by ultrafast laser pulse excitation of a biased metal-semiconductor interface", *Applied Physics Letters*, vol. 58, pp. 222-224, 1991.
- [15] G. Matthaus, S. Nolte, "Microlens coupled interdigital photoconductive switch", *Applied Physics Letters*, vol. 93, no. 9, pp. 091110-091113, 2008.
- [16] S. G. Park, Y. Choi, and K. H. Jeong, "High power, THz photoconductive antenna using localized surface plasmon resonance", *IEEE Optical MEMS and Nanophotonics*, Sapporo, Japan, 2010.
- [17] M. V. Exter, D. R. Grischkowsky, "Characterization of an optoelectronic terahertz beam system", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 38, no. 11, pp. 1684-1691, 1990.
- [18] C. Lin, C. Chen, A. Sharkawy, G. J. Schneider, S. Venkataraman, and D. W. Prather, "Efficient terahertz coupling lens based on planar photonic crystals on silicon on insulator", *Optics Letters*, vol. 30, no. 11, pp. 1330-1332, 2005.
- [19] J. Lee, K. Lee, H. Park, G. Kang, D. Yu, and K. Kim, "Tunable subwavelength focusing with dispersion-engineered metamaterials in the terahertz regime", *Optics Letters*, vol. 35, no. 13, pp. 2254-2256, 2010.
- [20] H. T. Chen, W. J. Padilla, J. M. O. Zide, A. C. Gossard, A. J. Taylor, and R. D. Averitt, "Active metamaterial terahertz devices", *Nature*, vol. 444, pp.

- 597-600, 2006.
- [21] J. Han, A. Lakhtakia, and C. W. Qiu, "Terahertz metamaterials with semiconductor split-ring resonators for magnetostatic tunability", *Optics Express* vol. 16, pp. 14390-14396, 2008.
- [22] J. Han, A. Lakhtakia, "Semiconductor split-ring resonators for thermally tunable terahertz metamaterials", *Journal of Modern Optics*, vol. 56, no. 4, pp. 554-557, 2009.
- [23] H. T. Chen, J. F. O'Hara, A. K. Azad, A. J. Taylor, R. D. Averitt, D. B. Shrekenhamer, and W. J. Padilla, "Experimental demonstration of frequency-agile terahertz metamaterials", *Nature Photonics*, vol. 2, pp. 295-298, 2008.
- [24] H. Tao, A. C. Strikwerda, K. Fan, W. J. Padilla, X. Zhang, and R. D. Averitt, "Reconfigurable terahertz metamaterials", *Physical Review Letters*, vol. 103, pp. 147401-147404, 2009.
- [25] A. Bergner, U. Heugen, E. Bründermann, G. Schwaab, M. Havenith, D. R. Chamberlin, and E. E. Haller, "New p-Ge THz laser spectrometer for the study of solutions: THz absorption spectroscopy of water", *Review of Scientific Instruments*, vol. 76, no. 6, p. 063110, 2005.
- [26] S. Komiyama, O. Astafiev, V. Antonov, T. Kutsuwa, and H. Hirai, "A singlephoton detector in the far-infrared range", *Nature*, vol. 403, pp. 405-407, 2000.

≡ 필자소개 ≡

정 기 훈



1996년 2월: 성균관대학교 기계공학과 (공학사)
 1998년 2월: 성균관대학교 기계공학과 (공학석사)
 2005년 5월: 미국 UC Berkeley, 기계공학과 (공학박사)
 2005년 3월~2006년 11월: 미국 UC Berkeley 전자공학과 박사후 연수원

2006년 12월~현재: 한국과학기술원 바이오 및 뇌공학과 교수
 [주 관심분야] Optical/THz MEMS, Bionanophotonics, Bioinspired Photonics, Bionanoplasmonics 등

박 현 철



2008년 2월: 한국과학기술원 바이오 및 뇌공학과 (공학사)
 2010년 2월: 한국과학기술원 바이오 및 뇌공학과 (공학석사)
 2010년 3월~현재: KAIST 바이오 및 뇌공학과
 [주 관심분야] Biophotonic MEMS

박 상 길



2009년 2월: 한양대학교 바이오 및 뇌공학과 (공학사)
 2009년 3월~현재: 한국과학기술원 바이오 및 뇌공학과
 [주 관심분야] Bionanoplasmonics

김 재 준



2008년 8월: 한국과학기술원 바이오 및 뇌공학과 (공학사)
 2008년 9월~현재: 한국과학기술원 바이오 및 뇌공학과
 [주 관심분야] Bioinspired Photonics 등