

# 테라헤르츠파 능동 변조 기술

이 중 옥

광주과학기술원

## I. 서 론

근·현대의 인류 문명은 마이크로파, 가시광선, 엑스레이 등을 아우르는 전자기파에 기반한 기술 발전과 그 맥을 같이 해 오고 있다. 마이크로파 이상의 긴 파장을 가지는 전파를 이용한 통신에서부터, 주로 가시광선이나 엑스레이 등을 활용한 의료 등의 산업에 이르기까지 각각의 전자기파 영역에서의 기술 발전은 인류가 경험해 보지 못했던 새로운 혜택을 제공하고 있다. 다양한 전자기파의 파장 영역이 현재 우리의 삶에 밀접하게 적용되고 있는 것과 달리, 최근에 관심이 증폭되고 있는 테라헤르츠파(THz) 영역은 실제 우리의 삶에 아직은 활용되어지고 있지 않다. 그래서 현재 테라헤르츠파는 전자기파 영역에 남아있는 미개척지(last frontier) 또는 테라헤르츠 갭(THz gap)이라 불리어지고 있다.

테라헤르츠파는 전자기 스펙트럼 상에 원적외선과 마이크로파 사이에 놓여 있는 영역으로 파장으로는 밀리미터 이하 파장(submillimeter waves)를 아우르고, 에너지로는 수 meV에 해당한다. 현재 테라헤르츠파는 초고주파 특성을 이용한 초고속 광통신 기술, 군사적 용도를 위한 근거리 무선 통신 기술, 대기 등에서의 물질 분석을 통한 전지구적 환경 부식을 통한 환경 기술, 의료나 보안 산업으로의 활용을 위한 이미징 기술 등 다양한 분야로의 응용 가능성이 모색되고 있고, 부분적으로 활용되고 있다.

현재 테라헤르츠파 기술 개발 방향은 크게 세부분으로 나뉘어진다고 할 수 있다. 하나는 테라헤르츠파 광원(소스)과 검출기를 개발하는 것이다. 기존의 전기적, 광학적 방법들은 고효율의 테라헤르츠파를 발

생시키는 데 한계를 가지고 있기 때문에 새로운 기술적 접근 방식이 필요하다. 두 번째는 테라헤르츠파에 기반한 분광 및 센싱/이미징을 위한 시스템을 개발하는 것이다. 마지막으로 테라헤르츠파에 기반한 시스템을 위한 핵심 소자들을 개발하는 것이다. 테라헤르츠파 필터, 어테뉴어터(attenuator), 커플러, 도파관, 스위치, 렌즈 등 테라헤르츠파 영역에서 작동하는 다양한 소자들을 개발해야 테라헤르츠파를 실제 삶에 활용할 수 있을 것이다.

본 원고에서는 테라헤르츠파 소자 기술의 핵심이 되는 변조(modulation) 기술에 대해 소개하고자 한다. 그 가운데에서 능동적인 방법으로 조절이 가능한 소자를 구현하고자 하는 능동 변조 기술들에 초점을 맞출 것이다. 이를 위해 현재 전 세계적으로 연구되어지고 있는 다양한 기술들에 대해 병렬적으로 열거하고자 한다.

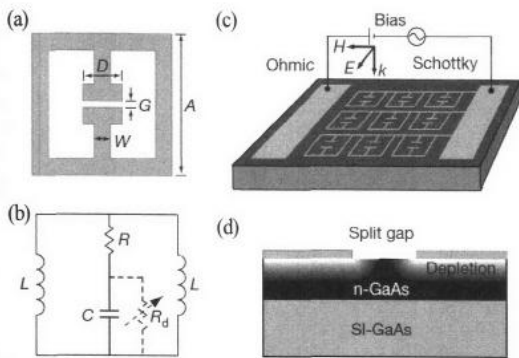
## II. 메타물질에 기반한 THz 능동 변조 기술

기본적으로 다른 물질이란 다른 성분 및 구조적 특성을 가지는 물질로 정의되어지고, 다른 물리·화학적 특성을 가진다. 마찬가지로 기존에 자연계에 존재하지 않는 물리·광학적 특성을 가지도록 구조화된 단위 구조를 배열하여 새로운 인공(artificial) 물질을 만들 수 있는데, 이런 물질들을 메타물질(metamaterial)이라고 한다. 특히 패턴화된 금속 구조를 이용하여 메타물질을 주로 제작하게 되는데, 이 경우 음굴절률(negative refractive index)과 같은 새로운 현상들을 볼 수 있을 뿐 아니라, 이와 같은 구조에 기반한 새로운 개념의 소자들을 개발할 수 있게 된다.

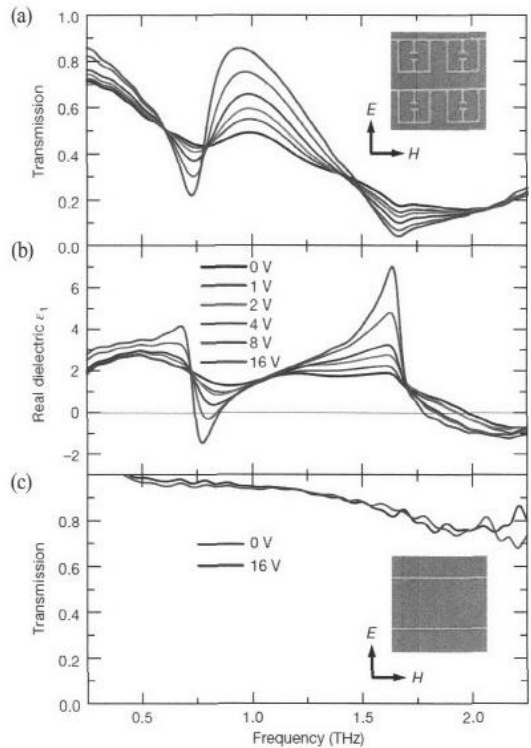
2006년 미국 로스알라무스 국립 연구소의 Averitt 연구 그룹은 메타물질을 이용하여 테라헤르츠파 투과를 능동적으로 조절할 수 있는 소자를 개발하였다<sup>[1]</sup>. 본 소자에서는 전기적 방법에 의해 실시간으로 테라헤르츠파의 투과 조절이 가능하다. 제시된 기본 구조는 [그림 1]에서 주어진다.

메타물질의 기본 구조는 갭(split gap)을 사이에 두고 서로 맞대고 있는 고리 구조 형태를 가진다. 이와 같은 구조에서는 인덕터(inductor)와 축전기(capacitor)의 특성이 나타나게 되면서 입사하는 전자기파를 제어할 수 있게 된다. 이와 같은 메타물질의 기본 단위를 규칙적으로 배열한 후에 [그림 1] (c)에서와 같이 전극을 설치한다. 이 경우, 전압의 주어진다면 갭 사이에 전하가 모이면서 금속성을 띄게 되고, 이로 인해 테라헤르츠파가 차단되게 된다. [그림 2]에서 보는 것처럼 이 방식은 특정 파장 영역대에서 최대 50% 정도의 변조 효율을 보여준다.

메타물질을 이용하여 테라헤르츠파를 변조하는 기술은 그 이후 지속적으로 연구가 진행되었다. 테라헤르츠파의 투과 변조뿐 아니라 위상 변조 기술이 위 연구 그룹에서 연구되었다<sup>[2]</sup>. 기본적인 구조는 [그림 3]에서 주어진다. 이 경우, 전압을 가하게 되면 결핍층



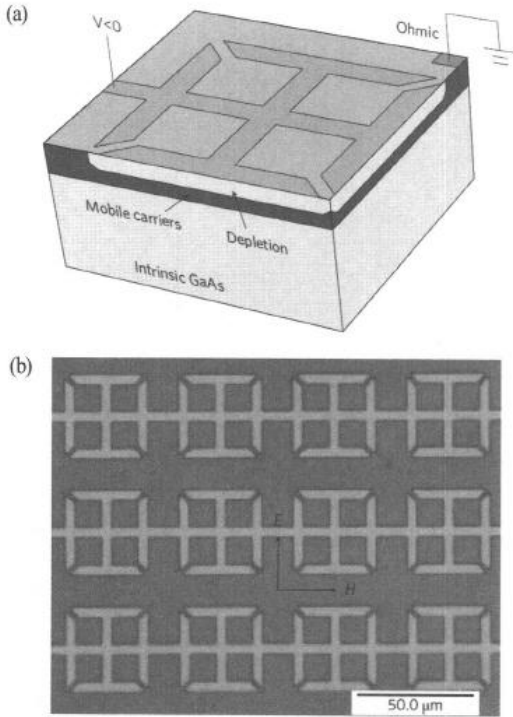
[그림 1] (a) 메타물질의 기본 단위 구조, (b) 기본 단위에 대응하는 회로, (c) 메타물질의 구조, (d) 갭에서의 기본 구조.



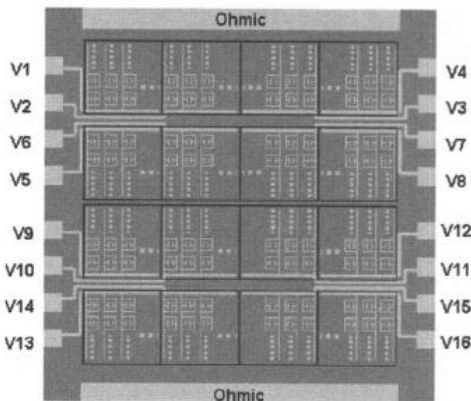
[그림 2] (a) 전압이 가해진 경우의 파장에 따른 투과 변조, (b) 유전율의 변화, (c) 메타 물질 구조가 없을 때의 변조 효율. 메타 물질이 없으면 투과 변조가 전혀 나타나지 않는다.

(depletion layer)내의 전하 밀도의 변화가 생기게 되고, 이에 따라 국소적인 유전율의 변화가 생기게 된다. 이때 테라헤르츠파의 투과 변조가 발생할 뿐 아니라, 위상의 변조가 가능하게 된다. 이와 같은 기술을 이용하면 초고속의 광학차르개(optical chopper)를 구현할 수 있을 것이다.

또한 메타물질을 이용하면 공간 변조(spatial modulation)가 가능하다<sup>[3]</sup>. [그림 4]에서 보는 것처럼, 메타물질 구조를 4×4 개의 픽셀을 가지는 어레이 형태로 만들면 각각의 픽셀을 독립적으로 변조할 수 있게 된다. 이를 통해 각각의 픽셀을 독립적으로 조절하여 공간상에 다양한 패턴을 구성할 수 있게 된다. 이 방



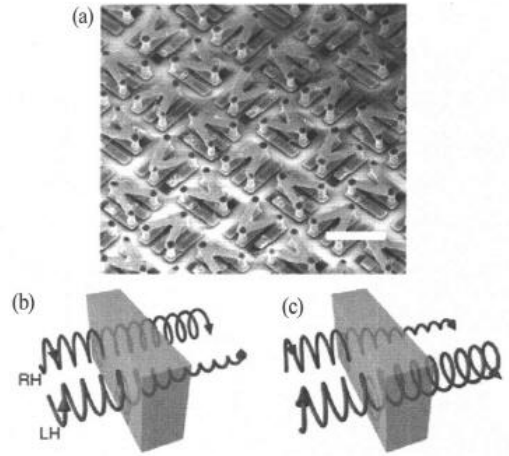
[그림 3] (a) 메타물질에 기반한 테라헤르츠파 위상 변조기의 기본 단위 구조, (b) 구조적 배열 패턴



[그림 4] 4x4개의 픽셀을 가지는 공간변조기

법은 낮은 전압에서 작동할 뿐 아니라, 에너지 손실이 적기 때문에 경제성도 동시에 가진다.

메타물질에 기반한 테라헤르츠파의 변조 기술은



[그림 5] (a) 나선성 메타물질의 SEM 이미지, (b) 나선성 메타물질은 하나의 원형 편광을 다른 원형 편광보다 더 강하게 흡수함, (c) 능동 스위칭 후의 편광 역전 현상

이후에도 꾸준히 발전해 오고 있다. 메타물질에 광여기를 이용하여 공진 파장의 위치를 20% 이상 능동적으로 조절하는 것도 가능하게 되었다<sup>[4]</sup>. 나선성(chiral) 메타물질을 이용하면 원형 편광의 극성도 능동적으로 조절할 수 있다<sup>[5]</sup>.

[그림 5]에서 보는 것처럼 물질 자체의 구조적인 변형없이 [그림 5] (a)에서와 같이 금속과 반도체의 복합적인 구조에 기반한 나선성 메타물질을 이용하면 두 개의 원형 편광 사이를 스위칭할 수 있게 된다. 이와 같은 원형 편광의 능동적 스위칭은 능동적으로 조절가능한 테라헤르츠파 원형 편광기 및 편광 변조기를 실현하는 핵심 기술 중 하나이다.

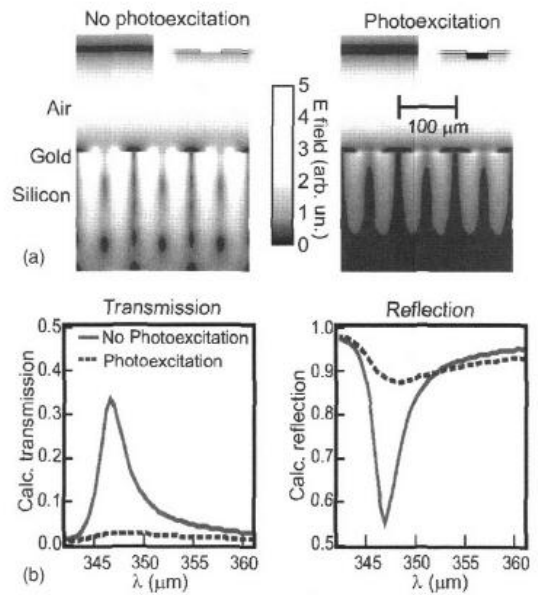
테라헤르츠파의 다양한 특성들(투과 세기, 위상, 편광, 위치공간, 파장, 등)에 대한 변조뿐 아니라, 각각의 특성의 효율을 극대화하는 노력도 함께 진행되고 있다. 메타물질에서 전기적 방법에 의한 테라헤르츠파의 변조 속도는 2 MHz 이상으로 향상되었으며<sup>[6]</sup>, HEMT와 메타물질의 결합 구조를 이용하여 10 MHz까지의 변조 속도를 얻어내기도 하였다<sup>[7]</sup>. 편광 비의 존적인 투과 변조 특성을 구현하는 것도 실제적인

응용을 위해서는 중요한 요소이다<sup>[8]</sup>. 또한 특정 파장 영역대에서 테라헤르츠파의 투과를 극단적으로 조절하여 밴드스탑(band-stop) 모드와 밴드패스(band-pass)를 능동적으로 특정 파장 위치에서 조절하기도 하였다<sup>[9]</sup>. 파장 조절의 극단적인 예로 금속으로 만들어진 split-ring 구조의 갭 사이에 반도체 층을 결합하여 능동적으로 split-ring 공진 모드와 닫힌 고리 공진 모드를 조절할 수 있는 메타물질 구조를 형성하여 공진 파장을 능동적으로 조절하기도 하였다<sup>[10]</sup>.

### III. 플라즈몬 구조 물질에 기반한 THz 능동 변조 기술

1998년 Ebbesen 그룹에서의 연구 이후<sup>[11]</sup>, 표면 플라즈몬에 대한 관심이 높아졌다. 테라헤르츠파 영역에서 표면 플라즈몬의 특성에 대한 연구가 2003년 이후 본격적으로 시작되면서, 플라즈몬 구조 물질을 이용하여 테라헤르츠파를 능동 변조하고자 하는 연구가 시작되었다. 플라즈몬 구조 물질을 이용하여 테라헤르츠파를 변조할 때 기본적인 개념은 다양한 방법을 통해 표면 플라즈몬을 발생시킬 수 있는 플라즈몬 구조를 광학적인 가시, 비가시 상태가 되도록 조절하는 것이다. [그림 6]에서 볼 수 있는 것처럼 광여기가 없을 경우에는 반도체 위에 금속으로 패터닝된 플라즈몬 금속 구조가 명확하지만, 광여기를 했을 경우 금속 구조 사이에 광여기된 전하들이 모이면서 금속성을 띄게 되어 테라헤르츠파 영역에서 전 영역이 금속면처럼 여겨지게 된다<sup>[12]</sup>. 그래서 광여기를 하면 테라헤르츠파의 투과가 차단되는 반면, 반사는 증가하고, 광여기를 하지 않았을 경우에는 그 반대가 된다. 이와 같은 방법으로 테라헤르츠파의 투과 및 반사를 광여기를 통하여 능동적으로 변조하게 된다.

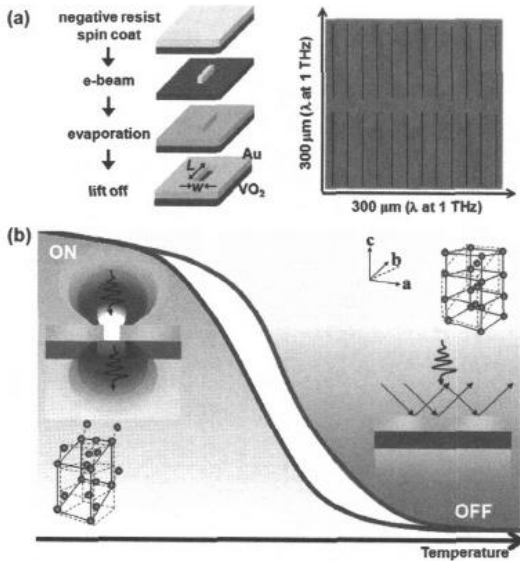
플라즈몬 구조 자체의 금속성을 변화시켜 테라헤르츠파 변조를 구현하기도 하였다<sup>[13],[14]</sup>. 테라헤르츠파 영역대에서는 도핑된 실리콘과 같은 경우, 자유전



[그림 6] (a) 광여기가 있을 때와 없을 때의 플라즈몬 구조에서의 전기장의 세기, (b) 광여기시의 투과 및 반사 특성 변화

하의 밀도에 따라 전도성의 차이가 생기게 된다. 자유 전하의 밀도가 높으면 테라헤르츠파 영역대에서 금속 특성을 보여주는 반면, 밀도가 낮으면 테라헤르츠파를 그대로 투과시키는 역할을 하게 된다. 그래서 도핑된 실리콘과 같은 반도체를 이용하여 플라즈몬 구조를 만들게 되면 광여기 등의 방법을 통해 표면 플라즈몬의 여기 여부를 조절할 수 있다. 이를 이용하여 테라헤르츠파의 투과 변조를 실현하게 된다.

최근에 산화물과 같은 다른 물질과 플라즈몬 금속 구조를 결합하여 테라헤르츠파를 능동적으로 조절하고자 하는 연구가 진행되었다. [그림 7]에서 보는 것처럼 VO<sub>2</sub>의 얇은 박막 위에 금속 슬랏의 패턴을 만들게 되면 VO<sub>2</sub>의 metal-insulator transition 현상을 이용하여 테라헤르츠파를 편조할 수 있게 된다<sup>[15]</sup>. 온도를 높이면 VO<sub>2</sub>층은 금속의 특성을 가지게 되고, 테라헤르츠파를 차단하게 된다. 하지만 낮은 온도에서는 VO<sub>2</sub>가 부도체의 특성을 가지게 되면서 테



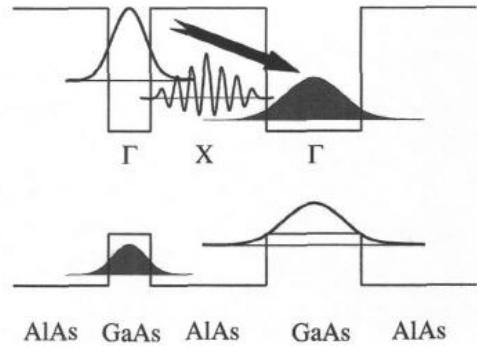
[그림 7] (a) VO<sub>2</sub> 얇은 박막 위에 금속 슬랏의 주기적인 구조를 형성, (b) 온도에 따른 VO<sub>2</sub>의 metal-insulator 간 전이 현상을 이용한 테라헤르츠파의 변조

라헤르츠파가 슬랏 갭을 지나가게 된다. 이때 표면 플라즈몬의 여기에 의해 큰 투과 향상 효과가 나타나게 되면서 테라헤르츠파의 변조 효율이 극대화된다.

이때 플라즈몬 금속 구조에서의 플라즈몬 여기 특성을 최적화하게 되면 변조 효율을 높일 수 있으며<sup>[16]</sup>, 전기적인 방법으로 테라헤르츠파를 변조하는 것도 가능하게 된다<sup>[17]</sup>. 플라즈몬 금속 구조를 이용한 테라헤르츠파의 변조 기술은 플라즈모닉스에서의 발전과 더불어 점점 그 특성이 향상되고 있다.

#### IV. 반도체 물성을 이용한 THz 능동 변조 기술

반도체 구조의 물성 특성을 이용하면 테라헤르츠파의 변조를 실현할 수 있다. [그림 8]에서 보는 것처럼 GaAs/AlAs의 양자 우물 구조를 이용하면 여기된 전자와 정공을 공간상으로 오랜 시간 분리시킬 수 있기 때문에 반도체 구조의 금속성을 오랫동안 지속



[그림 8] 양자 우물 구조에서 나타나는 여기된 전자와 정공의 분리 현상

시킬 수 있다<sup>[18]</sup>. 테라헤르츠파는 높은 밀도의 전하를 투과하지 못하기 때문에 이를 이용하면 테라헤르츠파의 변조를 구현할 수 있다.

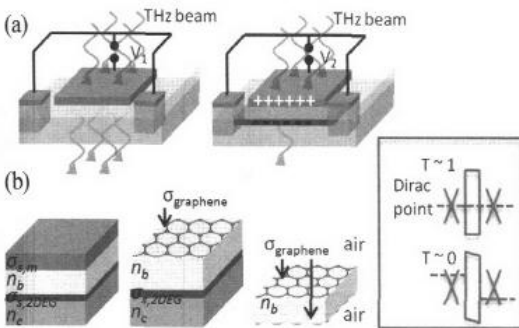
또한 GaAs/AlGaAs 구조와 외부 전압을 가할 수 있는 전극을 결합하면 외부 전압에 의해 능동적으로 조절이 가능한 테라헤르츠파 변조 소자를 구현할 수 있다<sup>[19]</sup>. 이는 GaAs/AlGaAs 구조에 의해 형성되는 two-dimensional electron gas(2DEG)안에서의 전자 밀도의 능동적 조절을 통해서 가능하게 된다.

#### V. 그래핀을 이용한 THz 능동 변조 기술

그래핀은 제로밴드갭을 가지는 이차원 반도체이다. 최근 탁월한 광전기적 특성으로 인해 다양한 디바이스에 그래핀을 이용하고자 하는 노력이 진행되고 있다. 그래핀을 사용하여 광대역(broadband) 테라헤르츠파 변조기를 개발하는 노력이 진행 중이다. Ref. 19의 연구에서와 같은 경우 2DEG를 이용하여 상온에서 작동하는 테라헤르츠파 변조기를 개발하긴 했지만, 변조 효율이 극히 낮은 단점을 가지고 있다. 이를 대체하기 위해 Ref. 1의 연구에서와 같이 메타물질이나 플라즈몬 구조 물질을 이용하여 변조 효율을 높이기 위한 노력을 시도하였다. 그러나 메타물질에 기반한 테라헤르츠파 변조 소자 제작에 있어서도 여러 단점

들이 있다. 변조 소자가 작동하는 밴드 폭이 좁을 뿐 아니라 편광 의존적인 특성으로 인하여 활용성이 제한되는 문제들이 있다. 이와 같은 문제들은 그래핀을 활용하는 경우 극복되어질 수 있다.

GaAs/AlGaAs 구조에서의 2DEG를 이용한 기존의 테라헤르츠파 변조기의 효율은 30 % 이하였다. 이 경우 금속으로 만들어진 게이트에서 생기는 테라헤르츠파의 투과 손실이 상당히 크다. 이를 해결하기 위해서는 테라헤르츠파 영역에서 투과성이 좋으면서 전도성도 동시에 가지고 있는 대체 물질이 필요하다. 그래핀은 높은 정공 이동도(hole mobility)를 가지면서 대칭적인 밴드 구조를 가지고 있기 때문에 이런 문제를 해결하기 위한 최적의 물질이라 할 수 있다. 최근 금속 게이트 대신에 그래핀을 이용하여 이론적으로 90 % 이상의 테라헤르츠파 변조 효율을 얻을 수 있다는 사실이 확인되었다<sup>[20]</sup>. [그림 9] (a)에서 보는 것처럼 테라헤르츠파의 투과 변조는 금속 게이트를 이용하여 2DEG의 밀도를 전기적으로 조절하면서 얻을 수 있다. 이 경우 금속 게이트를 [그림 9] (b)에서 보는 것처럼 그래핀 단일층으로 대체하게 되면 테라헤르츠파의 투과 손실 없이 고효율 변조가 가능하게 된다.

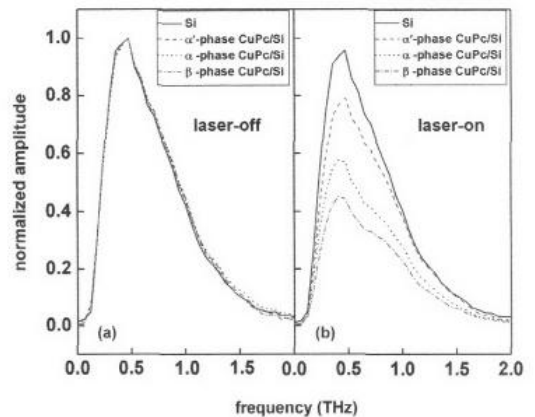


[그림 9] (a) 2DEG 기반의 테라헤르츠파 변조기의 기본 원리, (b) 그래핀에 기반한 테라헤르츠파 변조기의 기본 층 구조. 박스 안은 그래핀/부도체/그래핀 구조에서의 에너지 밴드 특성을 보여준다.

또한 그래핀 자체의 상태 밀도(density of states)를 조절하면 그래핀을 투과하는 테라헤르츠파의 세기를 조절 가능하게 된다. 이 경우 광대역에서 작동하는 그래핀 기반 테라헤르츠파 변조기를 실현할 수 있다. 실제로 SiO<sub>2</sub>/Si의 표면 위에 대면적의 단일층 그래핀을 형성했을 때 상온에서 15 % 이상의 변조 효율, 5 % 이하의 에너지 손실, 0.75 THz에서 20 kHz 이상의 변조 속도를 성취하였다<sup>[21]</sup>. 이러한 연구 성과들은 그래핀이 테라헤르츠파 영역대에서의 다양한 소자들을 구성하는데 크게 기여할 수 있음을 보여주는 사례라 할 수 있다.

## VI. 유기물/반도체 복합 구조를 이용한 THz 능동 변조 기술

메타물질이나 그래핀 등에 기반한 기존의 테라헤르츠파 변조 기술들은 여러 가지 단점들을 가지고 있다. 그래핀에 기반한 테라헤르츠파 변조기의 경우 비록 이론적으로는 90 % 이상의 높은 효율을 달성할 것으로 예측되지만, 실제로는 15 % 정도 수준에 머무르고 있다. 메타물질의 경우도 변조 효율이 대략 50 %



[그림 10] (a) 광여기가 없을 경우의 테라헤르츠파의 투과 특성, (b) 광여기가 있을 경우 테라헤르츠파의 투과 변조 특성

수준에 머무르고 있다. 또한 복잡한 패턴을 제작해야 하는 문제, 메타물질이 본질적으로 가질 수밖에 없는 구조적인 문제로 인한 변조 파장 제한성 등의 문제들이 여전히 남아있다.

최근 이런 문제를 해결할 수 있는 새로운 방법이 제시되었다. 반도체인 실리콘 기판 위에 copper phthalocyanine(CuPc), C60 fullerene, pentacene 등의 유기물을 얇은 박막으로 증착하게 되면 능동적으로 테라헤르츠파를 변조할 수 있게 된다<sup>[2]</sup>. 이 결과는 특정 파장이 아닌 테라헤르츠파 영역 전파장에 대해서 50% 이상의 투과 효율을 보여준다. 높은 저항값을 가지는 실리콘 기판은 테라헤르츠파 영역에서 투명하기 때문에 기판에 의한 테라헤르츠파의 투과 손실이 거의 없다. 또한 실리콘 기판 위에 증착되는 유기물 층은 패턴이나 구조 없이 수 십에서 수백 나노 크기의 얇은 박막으로 형성되기 때문에 파장, 편광 등에 대한 의존성이 없기 때문에 유용한 테라헤르츠파 변조기를 만드는 것이 가능하다. 이러한 변조 특성이 나타나는 기본적인 원리는 반도체 층에서 여기된 전하들이 유기물 층으로 주입되면서 유기물 층에 높은 전하 밀도를 형성하여 테라헤르츠파 영역에서 금속성을 띄게 하기 때문이다. 유기물/반도체 복합 구조에 의한 테라헤르츠파의 능동 변조 방식은 다양한 유기물의 사용, 계면 특성에 대한 체계적인 연구, 적층형 복합 구조에 대한 연구 등을 통해서 충분히 더 좋은 효율을 얻는 것이 가능해서 보다 유용한 변조 방법이라고 할 수 있다.

## Ⅶ. 결 론

테라헤르츠파 기술의 기대되어지는 주 활용 분야는 초고속 광통신, 군사적 용도를 위한 근거리 무선 통신 기술에서부터 대기 등의 전지구적 환경 분석, 의료 및 보안 산업을 위한 이미징 기술에 이르기까지 다양하다. 테라헤르츠파에 기반한 센싱/이미징 시스

템을 구축하고, 테라헤르츠파 광통신을 실현하기 위해서는 테라헤르츠파를 자유자재로 발생, 조절, 전파, 변조시킬 수 있는 소자들을 개발하는 일이 선행되어야 한다. 그 가운데 가장 중요한 부분 중 하나는 테라헤르츠파의 여러 특성들(예를 들면 투과 및 반사, 편광, 위상, 공간 위치 등)을 변조할 수 있는 소자를 구현하는 것이다. 본 원고를 통하여 기존에 연구되어 온 다양한 테라헤르츠파 변조 방법들을 소개하였다. 메타물질이나 플라즈몬 구조 물질과 같은 새로운 구조 물질, 기존의 반도체 및 유기물의 물성 특성, 그래핀과 같은 신물질의 도입 등을 통해 이와 같은 연구가 다양한 방법으로 진행되었다. 이와 같은 방법들을 통하여 상당한 성과를 얻었음에도 불구하고 완전한 테라헤르츠파의 변조를 위해서는 아직 가야할 길이 많이 남아 있다. 하지만 테라헤르츠파의 변조 기술들을 기반으로 테라헤르츠파를 실생활에 응용하게 되면서 생길 삶의 질의 변화는 우리의 예측 이상이 될 것이며, 그렇게 먼 미래가 되지는 않을 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] H. T. Chen, W. J. Padilla, J. M. O. Zide, A. C. Gossard, A. J. Taylor, and R. D. Averitt, "Active terahertz metamaterial devices", *Nature*, vol. 444, pp. 597-600, Nov. 2006.
- [2] H. T. Chen, W. J. Padilla, M. J. Cich, A. K. Azad, R. D. Averitt, and A. J. Taylor, "A metamaterial solid-state terahertz phase modulator", *Nat. Photon*, vol. 3, pp. 148-151, Mar. 2009.
- [3] W. L. Chan, H. T. Chen, A. J. Taylor, I. Brener, M. J. Cich, and D. M. Mittleman, "A spatial light modulator for terahertz beams", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 94, p. 213511, May 2009.
- [4] 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", *Nat. Photon*, vol. 2, pp. 295-298, May 2008.
- [5] S. Zhang, J. Zhou, Y. S. Park, J. Rho, R. Singh, S. Nam, A. K. Azad, H. T. Chen, Z. Yin, A. J. Taylor, and X. Zhang, "Photon-induced handedness switching in terahertz chiral-molecules", *Nat. Communications*, vol. 3, p. 942, Jul. 2012.
- [6] H. T. Chen, S. Palit, T. Tyler, C. M. Bingham, J. M. O. Zide, J. F. O'Hara, D. R. Smith, A. C. Gossard, R. D. Averitt, W. J. Padilla, N. M. Jokerst, and A. J. Taylor, "Hybrid metamaterials enable fast electrical modulation of freely propagating terahertz waves", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 93, p. 091117, Sep. 2008.
- [7] D. Shrekenhamer, S. Rout, A. C. Strikwerda, C. Bingham, R. D. Averitt, S. Sonkusale, and W. J. Padilla, "High speed terahertz modulation from metamaterials with embedded high electron mobility transistors", *Opt. Express*, vol. 19, pp. 9968-9975, May 2011.
- [8] O. Paul, C. Imhof, B. Lagel, S. Wolff, J. Heinrich, S. Hofling, A. Forchel, R. Zengerle, R. Beigang, and M. Rahm, "Polarization-independent active metamaterial for high-frequency terahertz modulation", *Opt. Express*, vol. 17, pp. 819-827, Jan. 2009.
- [9] J. Gu, R. Singh, A. K. Azad, J. Han, A. J. Taylor, J. F. O'Hara, and W. Zhang, "An active hybrid plasmonic metamaterial", *Optical Material Express*, vol. 2, pp. 31-37, Dec. 2012.
- [10] D. R. Chowdhury, R. Singh, J. F. O'Hara, H. T. Chen, A. J. Taylor, and A. K. Azad, "Dynamically reconfigurable terahertz metamaterial through photo-doped semiconductor", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 99, p. 231101, Dec. 2011.
- [11] T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi, T. Thio, and P. A. Wolff, "Extraordinary optical transmission through subwavelength hole arrays", *Nature*, vol. 391, pp. 667-669, Feb. 1998.
- [12] E. Hendry, M. J. Lockyear, J. Gomez Rivas, L. Kuipers, and M. Bonn, "Ultrafast optical switching of the THz transmission through metallic subwavelength hole arrays", *Phys. Rev. B.*, vol. 75, p. 235305, Jun. 2007.
- [13] J. Gomez Rivas, P. H. Bolivar, and H. Kurz, "Thermal switching of the enhanced transmission of terahertz radiation through subwavelength apertures", *Opt. Lett.*, vol. 29, pp. 1680-1682, Jul. 2004.
- [14] E. Hendry, F. J. Garcia-Vidal, L. Martin-Moreno, J. Gomez Rivas, M. Bonn, A. P. Hibbins, and M. J. Lockyear, "Optical control over surface-plasmon-polariton-assisted THz transmission through a slit aperture", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 100, p. 123901, Mar. 2008.
- [15] M. Seo, J. Kyoung, H. Park, S. Koo, H. S. Kim, H. Bernien, B. J. Kim, J. H. Choe, Y. H. Ahn, H. T. Kim, N. Park, Q. H. Park, K. Ahn, and D. S. Kim, "Active terahertz nanoantennas based on VO<sub>2</sub> phase transition.", *Nano Lett.*, vol. 10, pp. 2064-2068, May 2010.
- [16] S. B. Choi, J. S. Kyoung, H. S. Kim, H. R. Park, D. J. Park, B. J. Kim, Y. H. Ahn, F. Rotermund, H. T. Kim, K. J. Ahn, and D. S. Kim, "Nanopattern enabled terahertz all-optical switching on vanadium dioxide thin film", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 98, p. 071105, Feb. 2011.
- [17] Y. G. Jeong, H. Bernien, J. S. Kyoung, H. R. Park, H. S. Kim, J. W. Choi, B. J. Kim, H. T. Kim, K. J. Ahn, and D. S. Kim, "Electrical control of terahertz transmission through subwavelength hole arrays", *Nature*, vol. 461, pp. 497-500, Dec. 2009.



- hertz nano antennas on VO<sub>2</sub> thin film", *Opt. Express*, vol. 19, pp. 21211-21215, Oct. 2011.
- [18] I. H. Libon, S. Baumgartner, M. Hempel, N. E. Hecker, J. Feldmann, M. Koch, and P. Dawson, "An optically controllable terahertz filter", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 76, p. 2821, May 2000.
- [19] T. Kleine-Ostmann, P. Dawson, K. Pierz, G. Hein, and M. Koch, "Room-temperature operation of an electrically driven terahertz modulator", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 84, p. 35557, May 2004.
- [20] B. Sensale-Rodriguez, T. Fang, R. Yan, M. M. Kelly, D. Jena, L. Liu, and H. G. Xing, "Unique prospects for graphene-based terahertz modulators", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 99, p. 113104, Sep. 2011.
- [21] B. Sensale-Rodriguez, R. Yan, M. M. Kelly, T. Fang, K. Tahy, W. S. Hwang, D. Jena, L. Liu, and H. G. Xing, "Broadband graphene terahertz modulators enabled by intraband transitions", *Nat. Communications*, vol. 3, p. 780, Apr. 2012.
- [22] H. K. Yoo, C. Kang, Y. W. Yoon, H. Lee, J. W. Lee, K. Lee, and C. S. Kee, "Organic conjugated material-based broadband terahertz wave modulators", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 99, p. 061108, Aug. 2011.

≡ 필자소개 ≡

이 중 욱



2001년 2월: 서울대학교 지구환경과학부  
(이학사)

2006년 8월: 서울대학교 물리학과 (이학  
박사)

2006년 9월~2007년 7월: 서울대학교 화  
학부 박사후연구원

2007년 11월~2010년 1월: 미국라이스  
대학교 전기컴퓨터공학부 박사후연구원

2010년 3월~현재: 광주과학기술원 고등광기술연구소 선임연  
구원

[주 관심분야] THz Spectroscopy/Imaging, THz Plasmonics