

# Band-switchable Terahertz Metamaterial Based on an Etched VO<sub>2</sub> Thin Film

Han-Cheol Ryu<sup>†</sup>

Department of IT Convergence Engineering, Sahmyook University, 815, Hwarang-ro, Nowon-gu, Seoul 01795, Korea

(Received November 12, 2019; Revised November 27, 2019; Accepted December 1, 2019)

We propose a band-switchable terahertz metamaterial based on an etched vanadium dioxide (VO<sub>2</sub>) thin film. A line of etched VO<sub>2</sub> thin film was placed in the center gap of the split square-loop shape for the tunability of the metamaterial. The resonance frequency of the metamaterial can be switched from the 1.4 THz band to the 0.7 THz band, according to the insulator-metal phase transition in the VO<sub>2</sub> thin film. The absolute difference in the transmittance of the metamaterial was 78.5% and 65.8% at 0.7 THz and 1.4 THz respectively, according to the band switching. The differential phase shift was around 90°, and the transmittance was stably maintained between 40% and 60% in the middle band of the two switchable resonance-frequency bands.

Keywords: Metamaterial, Vanadium dioxide, Terahertz, Transmittance, Phase shift

OCIS codes: (160.3918) Metamaterials; (310.6845) Thin film devices and applications; (300.6495) Spectroscopy, terahertz

## 식각된 VO<sub>2</sub> 박막을 이용한 밴드-전환형 테라헤르츠파 메타물질

류한철<sup>†</sup>

삼육대학교 IT융합공학과

☎ 01795 서울특별시 노원구 화랑로 815

(2019년 11월 12일 받음, 2019년 11월 27일 수정본 받음, 2019년 12월 1일 게재 확정)

본 논문에서는 온도 변화에 따라 절연체-금속 상전이 특성을 보이는 이산화바나듐(VO<sub>2</sub>)를 식각한 도선과 금속 도선을 조합한 밴드-전환형 테라헤르츠 메타물질을 제시하였다. 갭을 가지는 금속 사각 구조 가운데 식각된 VO<sub>2</sub> 도선을 위치시킨 구조와 VO<sub>2</sub> 상전이 특성을 이용하여 제안된 메타물질의 가변성을 확보하였다. 설계한 VO<sub>2</sub> 기반 메타물질은 VO<sub>2</sub>의 절연체-금속 상전이 특성에 따라 공진 주파수가 1.4 THz에서 0.7 THz으로 전환되었다. 이때, 제안한 메타물질의 절대 투과율은 0.7 THz와 1.4 THz에서 각각 78.5%와 65.8%로 높은 변화율을 가지고, 전환이 가능한 두 공진 주파수 중간 대역에서 40%와 60% 사이의 안정적인 투과율을 보이면서 균일하게 90도의 높은 차등 위상 변위 특성을 보였다.

Keywords: 메타물질, 이산화바나듐, 테라헤르츠, 투과율, 위상 변위

OCIS codes: (160.3918) Metamaterials; (310.6845) Thin film devices and applications; (300.6495) Spectroscopy, terahertz

### I. 서 론

테라헤르츠파는 전자기파 스펙트럼에서 마이크로파와 원적외선의 중간 영역에 해당하는 0.1~10 THz 대역의 주파수 자원으로, 마이크로파 생성 기술과 광파 생성 기술 모두 적용하기 어려워 오랜 기간 동안 미개발되어 ‘테라헤르츠 갭(terahertz gap)’으로 불리어 왔다. 이러한, 테라헤르츠파는 전파의 투과성과 광파의 직진성을 동시에 가지고 있고, 분자운동의 진동주파수 영역이 테라헤르츠파 주파수 대역에 존재하므로 물질의 성분 분석에 적합하여 물질의 물성, 분자, 생명 연구 등을 위한 분광 시스템, 이미징 시스템, 그리고 넓

은 주파수 대역폭을 이용한 초고속 무선 통신 시스템 등 다양한 분야에 응용이 가능하여 많은 연구가 진행되고 있다<sup>[1-4]</sup>. 그러나 실질적으로 테라헤르츠 대역에서 사용 가능한 소자의 개발은 자연계 물질의 전기적, 자기적 특성이 테라헤르츠파 주파수 대역에서 소자로 활용되기에 적합하지 않아 마이크로파나 광파 대역에 비교하여 매우 부족한 상황이다. 그러므로 인공적으로 전기/자기적 특성을 제어할 수 있는 메타물질을 테라헤르츠파의 소자로서 활용하는 연구가 많은 관심을 받아 왔다. 메타물질은 관심 파장보다 작은 크기의 유닛 셀을 금속이나 유전체 물질을 이용하여 형성하고 주기적으로 배열하여 전체 구조를 균일한 물질로 인식하도록 인

<sup>†</sup>E-mail: [hcryu@syu.ac.kr](mailto:hcryu@syu.ac.kr), ORCID: 0000-0002-2867-1127

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

공적으로 만들어낸 물질이다. 이러한 메타물질은 자연계에는 존재하지 않는 특이한 성질인 음의 굴절률이나 투명한 형상 등을 탄생시킬 수 있어 다양한 분야에서 연구가 이루어지고 있다<sup>15,16</sup>. 메타물질을 구현하기 위해서는 그 구조가 파장 대비 매우 작은 크기로 형성되어야 하므로, 광학 주파수 대역보다는 일반적인 광리소그래피 기술로 메타물질 구현이 가능한 테라헤르츠 대역에서 그 활용도가 크므로 테라헤르츠 대역에서 메타물질 기반 필터나 센서 등의 소자로 응용하는 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>17,18</sup>. 또한, 테라헤르츠 메타물질의 특성은 메타물질을 형성하는 기판의 특성에 따라 달라지므로 기판의 유전율의 실수부와 허수부를 변화시킴으로 메타물질의 공진 주파수와 공진 진폭을 변화시킬 수 있다. 메타물질을 형성하는 기판은 외부 에너지 즉, 광학적 펌핑, 전압 인가, 온도 변화 등을 통하여 그 특성 변화가 가능하므로, 외부 에너지 인가를 통한 테라헤르츠 메타물질의 능동성 확보는 테라헤르츠 소자를 더욱 다양한 분야로 응용 가능하게 한다<sup>9-12</sup>. 최근에는 이산화바나듐( $\text{VO}_2$ )을 이용하여 많은 메타물질 기반의 테라헤르츠 능동 소자 응용 가능성을 보여주고 있다.  $\text{VO}_2$  물질은 절연체-금속 상전이 340 K에서 발생하는데, 이는 온도에 따라서  $\text{VO}_2$ 의 격자 구조가 변하여 유전체 상에서 금속 상으로 변하여 물질의 도전을 변화를 일으킨다. 이러한  $\text{VO}_2$  물질의 도전을 변화하여 메타물질의 능동성 확보에 적용하려는 많은 연구들이 진행되고 있다<sup>13-16</sup>.

본 논문에서는 특정 온도에서 절연체-금속 상전이 특성을 보이는  $\text{VO}_2$  박막을 식각하여 라인 형태의 도선을 구현하고 그 위에 테라헤르츠 대역 금속 메타물질을 형성하여, 온도 변화를 통하여 특성 조절이 가능한 밴드-전환형 테라헤르츠 메타물질을 제안하였다. 본 구조는 온도에 따른  $\text{VO}_2$  박막의 특성 변화를 통하여 메타물질을 투과하는 테라헤르츠 투과파의 투과량 조절이 가능하면서 동시에 투과파의 위상의 조절이 가능하도록 하였다. 이와 같은 능동형 테라헤르츠 메타물질 소자는 테라헤르츠파의 투과량 및 위상 조절이 필요한 테라헤르츠 응용 분야에 다양하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## II. 밴드-전환형 테라헤르츠 메타물질의 투과 특성

절연체-금속 상전이 특성을 보이는  $\text{VO}_2$  박막을 단순한 라인 형태로 식각하고 그 위에 금속 도선을 형성하여 구성된 밴드-전환형 테라헤르츠 메타물질의 기본 셀 구조도를 그림 1에 나타내었다. 본 구조는 식각된  $\text{VO}_2$  도선이 겹을 가지는 사각 구조 메타물질의 가운데 위치시킨 형태로, 단순한 라인 형태의  $\text{VO}_2$  박막 패턴과 박막 패턴 양 쪽으로 연결되어 있는  $\pi$ -형태의 두 개의 금속 도선 공진기로 구성되어 있다. 라인 형태의 이산화바나듐( $\text{VO}_2$ ) 박막은 온도에 따라 절연체와 금속 상전이 특성을 보이므로 절연체 상태에서는 두 개의  $\pi$ -형태 공진기가 전기적으로 분리되어 있지만, 금속 상태에서는 두 개의 공진기를 전기적으로 연결하여 새로운 공진 특성을 만들 수 있게 된다. 메타물질의 기본 셀 구조는 정사각

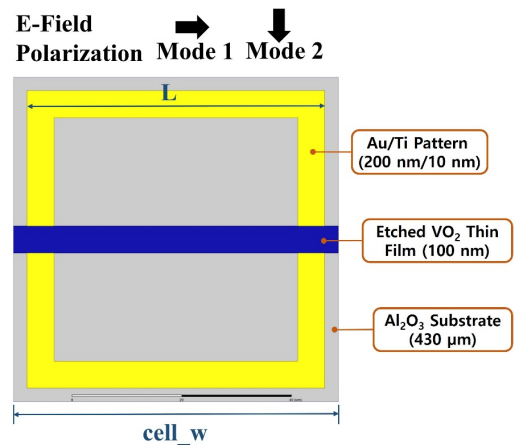


Fig. 1. Configuration of a band-switchable terahertz metamaterial based on an etched  $\text{VO}_2$  thin film.

구조를 가지고 주기길이( $cell\_w$ )는  $60 \mu\text{m}$ 이다. 메타물질을 구성하는 기본 구조인  $\pi$ -형태 공진기의 세로 길이는  $50 \mu\text{m}$ 이고, 식각된  $\text{VO}_2$  박막 라인의 폭과 연결된 두 개의  $\pi$ -형태 공진기의 가로 길이도 세로 길이와 동일한  $50 \mu\text{m}$ 이다. 일반적인 광리소그래피 기술로 쉽게 구현하기 위하여 메타물질을 형성하는  $\text{VO}_2$  박막 도선과 금속 도선의 폭( $w$ )은 모두  $5 \mu\text{m}$ 로 정하였다.  $\text{VO}_2$  박막 증착용 기판으로는 부도체 상태의  $\text{VO}_2$ 와 유전율이 유사하고  $\text{VO}_2$  증착용 기판으로 많이 쓰이는 두께  $430 \mu\text{m}$ 의 알루미늄( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )을 사용하였고,  $\text{VO}_2$ 의 두께는  $100 \text{ nm}$ 로 설정하였다. 메타물질 형성용 메탈로 두께  $200 \text{ nm}$ 의 금을 이용하였다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 단위 격자의 메타물질 구조는 가로 방향과 세로 방향이 동일하지 않으므로  $\text{VO}_2$  기반 메타물질에 입사되는 테라헤르츠파 전계 방향에 따라 메타물질의 특성이 다르게 나타난다. 메타물질의 특성 계산을 위하여 그림 1과 같이  $\text{VO}_2$  기반 메타물질을 형성한 위쪽 방향에서 메타물질이 형성된 기판 방향으로 평면파를 입사하고, 평면파의 전계 방향이 식각된  $\text{VO}_2$  도선과 평행한 경우를 모드 1, 전계 방향이 식각된  $\text{VO}_2$  도선에 수직인 경우를 모드 2로 설정하였다. 식각된  $\text{VO}_2$  박막 도선과 결합된  $\pi$ -형태 금속 도선을 이용한 밴드-전환형 테라헤르츠 메타물질은 Ansys사의 HFSS 전자파 시뮬레이터를 이용하여 시뮬레이션하였다. 절연체 상에서  $\text{VO}_2$  박막은 테라헤르츠 대역에서 비교적 투명하고, 유전상수는 9이다. 테라헤르츠 대역에서의  $\text{VO}_2$ 의 유전특성은 Drude 모델을 따르므로,  $\text{VO}_2$  박막의 유전함수와 플라즈마 주파수는 식 (1)로 표현된다. 여기서,  $\epsilon_m$ 과  $\epsilon_i$ 는 각각  $\text{VO}_2$ 가 금속 상과 절연체 상일 때의 유전상수를 나타내고, 완화시간  $\tau$ 는  $2.27 \text{ fs}$ 이다<sup>17,18</sup>.

$$\epsilon_m(\omega) = \epsilon_i - i \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i/\tau)}, \text{ where } \omega_p^2 = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \tau} \quad (1)$$

위의 식에서와 같이  $\text{VO}_2$  박막의 유전 특성은 박막의 도전을 변화에 의존하고  $\text{VO}_2$  박막의 도전율은 온도에 따라 변화

한다. 식각된 VO<sub>2</sub> 박막을 이용한 그림 1 구조의 이중  $\pi$ -형태 공진기 구조의 능동형 메타물질 특성 변화를 계산하기 위하여 인가된 전압 변화에 따른 VO<sub>2</sub>의 도전을 변화는 10 S/m에서 100,000 S/m로 설정하였다.

제안된 메타물질 구조에 테라헤르츠파가 입사되었을 때의 투과율 전자파 해석 시뮬레이션 결과를 그림 2에 나타내었다. 그림 2(a)와 2(b)는 각각 모드 1과 모드 2에서 동작할 경우를 나타낸다. 그림 2(a)와 같이 모드 1의 경우 입사하는 테라헤르츠파 전계의 방향이 식각된 VO<sub>2</sub> 박막 라인 패턴의 방향과 동일하므로, 두 개의  $\pi$ -형태 공진기의 세로 방향 구조에서 기인한 0.7 THz 대역의 강한 기본 공진이 나타난다. VO<sub>2</sub> 박막의 특성이 절연체에서 금속으로 상전이되는 과정에서 도전율이 증가함으로 인하여 테라헤르츠파 메타물질의 품질인자(Q factor)가 낮아지면서 공진의 강도는 약해지고, 완전히 금속의 성질을 가지게 되는 경우 긴 금속 도선의 역할로 인하여 강한 저주파 공진이 나타남을 확인할 수 있다. 그림 2(b)와 같이 모드 2의 경우는 입사하는 테라헤르츠파 전계의

방향이 식각된 VO<sub>2</sub> 박막 라인 패턴의 방향과 수직하므로,  $\pi$ -형태 공진기의 가로 방향 구조에서 기본 공진을 야기하게 된다. 그러므로 VO<sub>2</sub> 박막이 절연체 상태일 경우, 모드 2의 기본 공진은 모드 1의 기본 공진의 두 배의 주파수 대역인 1.4 THz 대역에서 발생하게 된다. 이는 식각된 VO<sub>2</sub> 박막 라인과 두 개의  $\pi$ -형태 공진기 조합의 메타물질이 정사각 구조를 가지므로  $\pi$ -형태 공진기의 세로 대비 가로 구조에서 야기되는 공진은 두 배의 주파수 차이를 발생시키기 때문이다. VO<sub>2</sub> 박막의 온도 변화를 통하여 그 특성이 절연체에서 금속으로 상전이되는 과정에서 도전율이 증가함으로 인하여 테라헤르츠파 메타물질의 품질인자가 낮아져서 1.4 THz 대역 기본 공진의 강도가 낮아지면서 공진은 새로운 0.7 THz 대역의 공진으로 전환되는 것을 확인할 수 있다. 이는 VO<sub>2</sub> 박막의 상전이를 통하여 VO<sub>2</sub> 박막이 두 개의  $\pi$ -형태 공진기를 전기적으로 연결하여 모드 1에서 발생한  $\pi$ -형태 공진기의 세로 구조에서 기인한 공진과 동일한 형태의 공진이 나타나기 때문이다. 결과적으로, VO<sub>2</sub> 박막의 절연체-금속 상전이

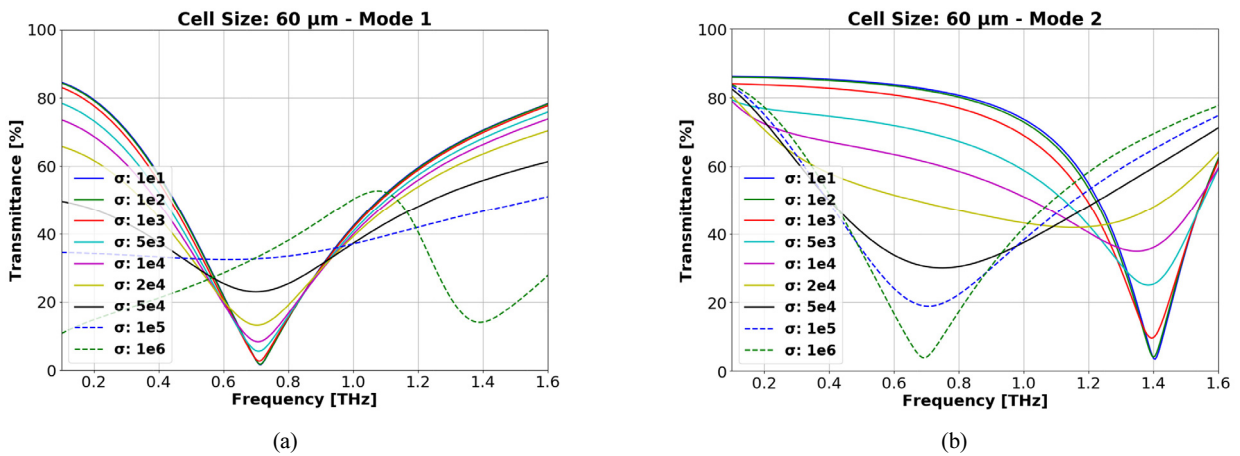


Fig. 2. Transmittance of a band-switchable terahertz metamaterial based on an etched VO<sub>2</sub> thin film. (a) Mode 1. (b) Mode 2.

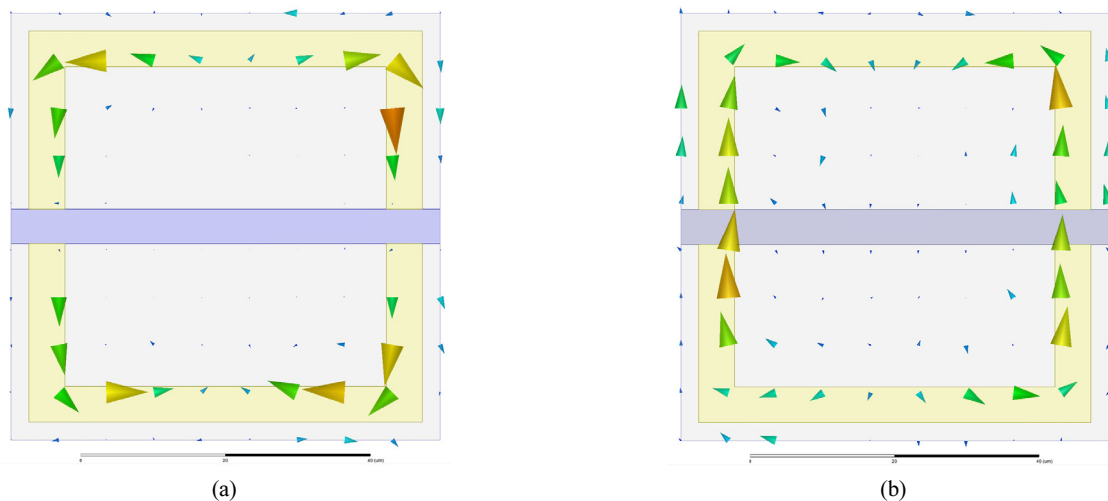


Fig. 3. Surface current density of a band-switchable terahertz metamaterial based on an etched VO<sub>2</sub> thin film operated in mode 2. (a) Insulator phase ( $\sigma = 10$ ). (b) Metal phase ( $\sigma = 10^6$ ).

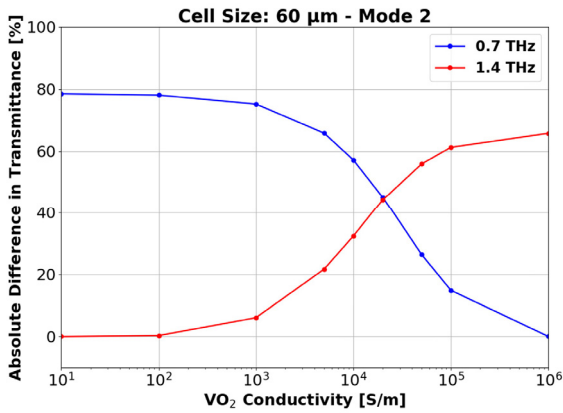


Fig. 4. Absolute difference in transmittance in mode 2 of a band-switchable terahertz metamaterial based on an etched VO<sub>2</sub> thin film.

를 통하여 제안된 구조의 메타물질의 밴드 전환이 명확하게 발생함을 확인할 수 있다. 절연체상에서 보여주는 공진이 금속으로 변하면서 생기는 메타물질의 투과율은 82.5%에서 4.0%로 변화하였고, 절연체상에서 공진이 없다가 금속으로 변하면서 생기는 메타물질의 투과율은 3.7%에서 69.5%로 변화하였다.

그림 3(a)와 3(b)는 제안된 메타물질이 모드 2에서 동작할 경우, 각각 VO<sub>2</sub> 박막이 절연체 상을 가지는 경우의 공진과 금속 상을 가지는 경우의 공진일 때의 표면전류밀도를 나타낸다. 그림 3(a)의 경우, 모드 1의 기본 공진의 두배 되는 주파수 대역인 1.4 THz에서의 표면전류밀도로, VO<sub>2</sub> 박막의 절연 특성으로 인하여 두 개의  $\pi$ -형태 공진기에서 발생하는 각각의 공진이 명확하게 구분되어 발생함을 확인할 수 있다. 반면에, 그림 3(b)의 경우, 모드 1의 기본 공진과 정확하게 동일한 0.7 THz에서의 표면전류밀도로, 두 개의  $\pi$ -형태의 공진기와 VO<sub>2</sub> 박막이 조합되어 정사각 구조를 이루고 박막의 금속 특성으로 인하여  $\pi$ -형태의 세로 방향 공진과 동일한 형태의 표면전류밀도를 가짐을 확인할 수 있다.

그림 4의 경우, VO<sub>2</sub> 특성이 절연체상에서 금속상으로 변화되는 과정에서 식각된 VO<sub>2</sub> 박막 기반의 밴드-전환형 메타물질이 동작하는 두 공진 대역에서 보여주는 투과율의 변화를 나타낸다. 절연체상에서 보여주는 공진이 금속으로 변하면서 생기는 메타물질의 절대 투과율의 변화율은 65.8%, 절연체상에서 공진이 없다가 금속으로 변하면서 생기는 메타물질의 절대 투과율의 변화율은 78.5%로 밴드 전환에 따른 영향으로 매우 높은 변화율 특성을 보였다. 이러한 테라헤르츠 투과 변화율 조절 특성은 테라헤르츠 변조기 등 다양한 테라헤르츠 응용 분야에 활용이 가능할 것으로 판단된다.

### III. 밴드-전환형 테라헤르츠 메타물질을 이용한 위상 변위 특성

제안된 메타물질 구조에 테라헤르츠파가 입사되었을 때의 투과파의 위상을 그림 5에 나타내었다. 그림 5(a)와 5(b)는 각각 모드 1과 모드 2에서 동작할 경우를 나타낸다. 그림 5(a)와 같이 모드 1의 경우, 공진이 나타났던 0.7 THz 대역에서 급격한 위상 변화 특성을 보이다가 VO<sub>2</sub> 박막의 도전율이 증가함으로 인하여 테라헤르츠 메타물질의 품질인자가 낮아지면서 위상의 변화율이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 그림 5(b)에 나타낸 모드 2의 경우, VO<sub>2</sub> 박막이 절연 상태일 경우에 발생한 1.4 THz 대역에서 큰 위상 변화 특성을 보이다가 VO<sub>2</sub> 박막의 도전율이 증가함에 따라 새로운 공진이 생기는 0.7 THz 대역으로 큰 위상 변화 특성이 이동한다. 그 결과 두 공진 주파수 대역 사이에 일정한 절대 위상 변위 특성을 보이는 것을 확인할 수 있다. 모드 2에서 동작하는 밴드-전환형 메타물질의 상대 위상 변위 특성을 그림 6(a)에 나타내었다. 밴드가 전환되는 두 공진 주파수 사이의 주파수 대역에서 90도의 큰 차등 위상 변위 특성을 보였다. 특히, 1.16 THz에서 1.22 THz 대역에서는 40%와 60% 사이의 안정적으로 유지되는 테라헤르츠 투과율을 보이면서 균일하게 90도의 높은 차등 위상 변위 특성을 보였다. 1.16 THz와

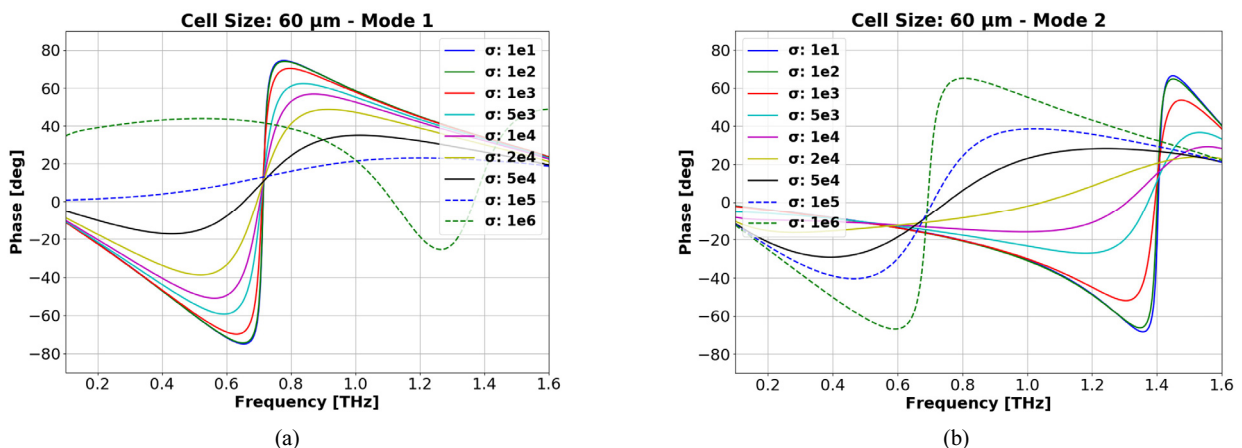
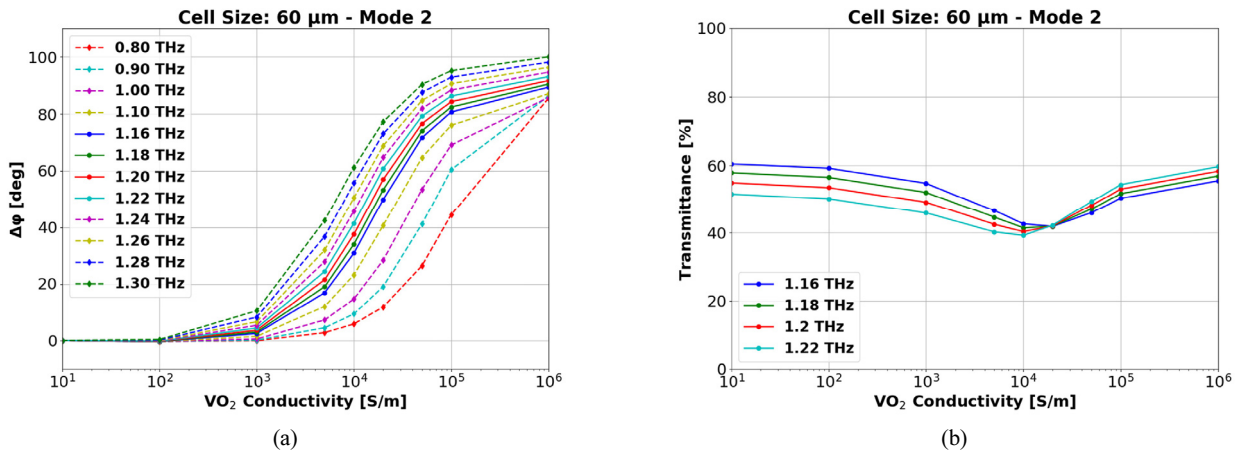


Fig. 5. Phase characteristics of the transmitted wave through a band-switchable terahertz metamaterial based on an etched VO<sub>2</sub> thin film. (a) Mode 1. (b) Mode 2.



**Fig. 6.** (a, b) Differential phase-shift characteristics (a) and transmittance (b) of the transmitted wave operated in mode 2 through a band-switchable terahertz metamaterial based on an etched VO<sub>2</sub> thin film.

1.22 THz 대역의 테라헤르츠 투과율 특성은 그림 6(b)에 나타내었다. 이러한, 안정적으로 일정한 투과율을 가지면서 높은 차등 위상 변위 특성을 가지는 테라헤르츠 메타물질은 테라헤르츠 빔 포밍 응용을 비롯하여 다양한 테라헤르츠 응용 분야에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 온도 변화에 따라 절연체-금속 상전이 특성을 보이는 이산화바나듐(VO<sub>2</sub>)을 식각한 도선과 메타물질을 조합한 밴드-전환형 테라헤르츠 메타물질을 제시하였다. 본 구조는 단순한 라인 형태의 VO<sub>2</sub> 박막 패턴과 박막 패턴 양쪽으로 연결되어 있는  $\pi$ -형태의 두 개의 금속 도선 공진기로 구성되어 있다. 식각된 VO<sub>2</sub> 도선은 VO<sub>2</sub> 온도에 따라 절연체 또는 금속 도선으로 조절되어, 두 개의  $\pi$ -형태 공진기의 전기적 연결 여부를 결정할 수 있다. 그러므로 VO<sub>2</sub>의 절연체-금속 상전이에 특성에 따라 제안한 메타물질의 공진 주파수 밴드가 1.4 THz 대역에서 0.7 THz 대역으로 명확한 전환이 가능하였다. 이때, 메타물질의 절대 투과율이 0.7 THz와 1.4 THz에서 각각 78.5%와 65.8%의 높은 변화율을 보였다. 또한, 전환이 가능한 두 공진 주파수 밴드 중간 대역에서 40%와 60% 사이에서 안정적으로 유지되는 투과율을 보이면서 균일하게 90도의 높은 차등 위상 변위가 가능함을 확인하였다. 이러한 밴드-전환형 테라헤르츠 메타물질은 테라헤르츠 변조기 및 빔 포밍 등 테라헤르츠파의 투과량 및 위상 조절이 필요한 다양한 테라헤르츠 응용 분야에 활용이 가능할 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

This paper was supported by the Fund of the Sahmyook University in 2018.

#### References

1. P. U. Jepsen, D. G. Cooke, and M. Koch, "Terahertz spectroscopy and imaging - Modern techniques and applications," *Laser Photonics Rev.* **5**, 124-166 (2011).
2. M. Tonouchi, "Cutting-edge terahertz technology," *Nat. Photonics* **1**, 97-105 (2007).
3. H. B. Liu, H. Zhong, N. Karpowicz, Y. Chen, and X.-C. Zhang, "Terahertz spectroscopy and imaging for defense and security applications," *Proc. IEEE* **95**, 1514-1527 (2007).
4. H.-C. Ryu, N. Kim, S.-P. Han, H. Ko, J.-W. Park, K. Moon, and K. H. Park, "Simple and cost-effective thickness measurement terahertz system based on a compact 1.55 μm  $\lambda/4$  phase-shifted dual-mode laser," *Opt. Express* **20**, 25990-25999 (2012).
5. J. Valentine, S. Zhang, T. Zentgraf, E. Ulin-Avila, D. A. Genov, G. Bartal, and X. Zhang, "Three-dimensional optical metamaterial with negative refractive index," *Nature* **455**, 376-379 (2008).
6. D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr, and D. R. Smith, "Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies," *Science* **314**, 977-980 (2006).
7. M. Choi, S. H. Lee, Y. Kim, S. B. Kang, J. Shin, M. H. Kwak, K.-Y. Kang, Y.-H. Lee, N. Park, and B. Min, "A terahertz metamaterial with unnaturally high refractive index," *Nature* **470**, 369-373 (2011).
8. 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* **444**, 597-600 (2006).
9. 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. Photonics* **3**, 148-151 (2009).
10. L. Ju, B. Geng, J. Horng, C. Girit, M. Martin, Z. Hao, H. A. Bechtel, X. Liang, A. Zettl, Y. R. Shen, and F. Wang, "Graphene plasmonics for tunable terahertz metamaterials," *Nat. Nanotechnol.* **6**, 630-634 (2011).

11. 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. Commun.* **3**, 780 (2012).
12. S. Yang, C. Tang, Z. Liu, B. Wang, C. Wang, J. Li, L. Wang, and C. Gu, "Simultaneous excitation of extremely high-Q-factor trapped and octupolar modes in terahertz metamaterials," *Opt. Express* **25**, 15938-15946 (2017).
13. H. C. Ryu, "Electrically controllable terahertz wave modulator based on a metamaterial and VO<sub>2</sub> thin film," *Korean J. Opt. Photon.* **25**, 279-285 (2014).
14. J.-H. Shin, K. H. Park, and H.-C. Ryu, "Electrically controllable terahertz square-loop metamaterial based on VO<sub>2</sub> thin film," *Nanotechnology* **27**, 195202 (2016).
15. D. J. Park, J. H. Shin, K. H. Park, and H. C. Ryu, "Electrically controllable THz asymmetric split-loop resonator with an outer square loop based on VO<sub>2</sub>," *Opt. Express* **26**, 17397-17406 (2018).
16. J.-H. Shin, S.-P. Han, M. Song, and H.-C. Ryu, "Gradual tuning of the terahertz passband using a square-loop metamaterial based on a W-doped VO<sub>2</sub> thin film," *Appl. Phys. Express* **12**, 032007 (2019).
17. F. Fan, W.-H. Gu, S. Chen, X.-H. Wang, and S.-J. Chang, "State conversion based on terahertz plasmonics with vanadium dioxide coating controlled by optical pumping," *Opt. Lett.* **38**, 1582-1584 (2013).
18. P. U. Jepsen, B. M. Fischer, A. Thoman, H. Helm, J. Y. Suh, R. Lopez, and R. F. Haglund Jr., "Metal-insulator phase transition in a VO<sub>2</sub> thin film observed with terahertz spectroscopy," *Phys. Rev. B* **74**, 205103 (2006).