



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

이학석사 학위논문

그래핀 메타표면을 이용한
테라헤르츠파의 광특성 변조

Active Modulation of Optical Properties of
Terahertz Wave using Graphene Metasurfaces

울산대학교 대학원

물리학과

정소담

그래핀 메타표면을 이용한
테라헤르츠파의 광특성 변조

지도교수 김튼튼

이 논문을 이학석사학위 논문으로 제출함

울산대학교 대학원

물리학과

정소담

정소담의 이학석사학위 논문을 인준함

심사위원 김 석 원 인

심사위원 임 성 현 인

심사위원 김 튼 튼 인

울 산 대 학 교 대 학 원

2 0 2 3 년 1 2 월

국문요약

그래핀 메타표면을 이용한 테라헤르츠파의 광특성 변조

울산대학교 대학원
물리학과
정소담

테라헤르츠파의 광학적 특성 제어는 차세대 무선 통신 및 의료 장비, 분광학 등 다양한 분야에 중요하다. 그중에서도 테라헤르츠파의 투과와 반사 진폭 및 편광의 능동적 제어는 테라헤르츠파의 응용 범위를 넓히는데 지대한 역할을 할 것이라 여겨진다. 본 논문에서는 2차원 인공구조인 메타표면과 2차원 물질인 그래핀을 결합하여 테라헤르츠파의 광학적 특성을 전기적으로 제어할 수 있는 방법에 대해 연구하였다.

먼저, 빛의 편광 특성을 효과적으로 제어할 수 있는 위상 지연자를 설계하였다. 강한 용량성 결합을 갖는 등방성 금속 메타표면 제작과 함께 그래핀을 한쪽 방향의 전극 갭에 패터닝하고 광전도도를 전기적으로 조절하여 굴절률을 조절하였다. 이중층 그래핀을 적용한 메타표면의 경우 90도의 상대적 위상 지연을 통해 입사된 선형 편광이 원형 편광으로 변환됨을 확인하였으며, 사분(1/4) 파장판으로 적용할 수 있음을 보였다.

두 번째로, 입사되는 빛의 투과와 반사 비율을 효과적으로 조절할 수 있는 능동형 빔 분할기를 구현하였다. 일반적으로 테라헤르츠파 빔 분할은 실리콘 웨이퍼의 도핑 레벨에 따른 임피던스로 구현된다. 그러나, 상대적으로 두꺼운 빔 분할기의 기관 내부에서 생기는 패브리-페로 효과에 의한 파형 복제 및 변형으로 인해 빔 분할이 일부 제한된다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 고분자를 기관으로 하고 동작 주파수보다 높은 주파수에서 공진을 갖는 메타표면을 적용하였다. 마찬가지로 그래핀을 결합하고, 그래핀의 전도도를 게이트 전압으로 조절하여 투과와 반사 진폭을 측정하였다. 그 결과 0.5에서 1.5 THz까지의 넓은 작동 주파수 범위에서 분산 특성 없이 입사된 빛을 분할할 수 있으며, 50:50의 분할 비율뿐만 아니라 40:60에서 77:23까지 분할 비율을 효율적으로 조절할 수 있음을 보였다. 본 연구에서 제안된 그래핀 메타표면을 통한 테라헤르츠파의 효과적인 능동 제어는 테라헤르츠 소자의 성능을 획기적으로 개선하고 소형화할 수 있으리라 기대된다.

목 차

제 1장 서론	1
1.1 연구배경	1
1.1.1 테라헤르츠파	1
1.1.2 테라헤르츠 메타표면 소자 및 연구 현황	2
1.1.3 그래핀의 광학적 특성	4
1.2 연구목적	5
제 2장 메타표면 소자 설계 및 제작	6
2.1 그래핀 메타표면 설계	6
2.1.1 위상 지연자	7
2.1.1.1 위상 지연 계산	9
2.1.2 빔 분할기	11
2.1.2.1 단층 그래핀과 그래핀 메타표면의 비교	13
2.2 제작 공정	15
2.2.1 그래핀 메타표면	15
2.2.2 그래핀 마이크로 리본 패터닝	17
2.2.3 유전체 이온 젤	18
제 3장 실험 및 결과	19
3.1 테라헤르츠 시간 영역 분광법 실험 장치를 이용한 그래핀 메타표면 소자 측정	19
3.2 실험 결과	21
3.2.1 위상 지연자	21
3.2.1.1 단층 그래핀 메타표면	21
3.2.1.2 이중층 그래핀 메타표면	23
3.2.1.3 편광 상태 분석	25
3.2.1.4 그래핀 메타표면의 추가 설계	27

3.2.2	빔 분할기	29
3.3	그래핀 메타표면 소자의 특성 분석	31
3.3.1	빔 분할 비	31
3.3.2	빔 분할기의 광대역 특성	33
제 4장	결론	35
	참고문헌	36
	영문요약	42

그림 목차

그림 1.1 능동형 메타표면 선행 연구. (a) 액정과 결합된 메타표면 [27]. 펨토초 레이저를 W/CoFeB/Pt에 조사하여 발생된 테라헤르츠파의 편광 상태를 액정의 정렬 상태에 따라 조절함. (b) 바나듐 산화물과 결합된 메타표면 [28]. 온도에 따라 절연체-금속 상이 변하는 바나듐 산화물과 결합하여 광다이오드 현상을 조절함. (c) 그래핀과 결합된 메타표면 [29]. 전기적으로 광전도도 조절 가능한 그래핀과 결합하여 투과도와 위상을 조절함. 3

그림 1.2 페르미 준위 E_F 의 변화에 따른 수치적으로 계산된 광전도도. (a) 주파수에 따른 광전도도 및 (b) DC 전도도. 4

그림 2.1 이중 H 형태의 메타 원자로 구성된 (a) 위상 지연자 및 (b) 빔 분할기 그래핀 메타표면의 개략도. 6

그림 2.2 (a) 그래핀의 페르미 준위가 전하 중성점인 경우와 (b) 게이트 전압 V_g 을 인가한 경우 메타표면의 금속 좁은 갭에 집속된 전기장 분포와 그때 투과된 테라헤르츠파의 편광 상태. 8

그림 2.3.1 패터닝된 그래핀의 페르미 준위가 (a, b) $E_{F,CNP} = 0 \text{ meV}$ 일 때와 (c, d) $E_{F,max} = 700 \text{ meV}$ 일 경우 투과 진폭 t_x, t_y 와 위상 ϕ_x, ϕ_y 10

그림 2.3.2 페르미 준위와 주파수의 함수로 그려진 (a) 투과 진폭 $|\Delta t|$ 및 (b) 위상 지연 $\Delta\phi$ 의 차이. 10

그림 2.4.1 (a) 빔 분할기 메타표면의 메타 원자 개략도. (b) 4.79 THz에서 공진하는 메타표면의 수치적 계산 결과. 11

그림 2.4.2 (a) 그래핀 메타표면 빔 분할 소자 개략도. 낮은 전압 인가를 위해 이온 겔을 적용하였다. (b) 평면 금속 전극을 통해 게이트 전압을 인가함으로써 테라헤르츠 빔 분할 비율 조절이 가능하다. 12

그림 2.5.1 페르미 준위의 함수로서 그려진 (a, b) 단층 그래핀만 있을 경우와 (c,

d) GMBS에 대한 경우의 투과 및 반사 진폭 스펙트럼.	14
그림 2.5.2 (a) 1.12 THz와 (b) 1.67 THz의 공진 주파수를 갖는 그래핀 메타표면.	14
그림 2.6 그래핀 메타표면의 공정 과정 개략도.	16
그림 2.7 제작된 그래핀 마이크로 리본의 개략도 및 현미경 사진.	17
그림 2.8 (a) 그래핀 및 전극 상에 전사된 이온 겔. (b) PCB 기판에 부착된 그래핀 메타표면.	18
그림 3.1 THz-TDS 구성의 개략도. (a) 위상 지연자의 편광을 측정하기 위한 와이어 그리드 편광판(WP)이 설치된 셋업과, (b) 빔 분할기의 투과와 반사를 측정하기 위한 렌즈를 이용한 측정 셋업.	20
그림 3.2.1 단층 그래핀 마이크로 리본으로 제작된 그래핀 메타표면의 실험적으로 측정된 (a) $ \Delta t $ 및 (b) $ \Delta\phi $ 의 결과. 검은색, 빨간색, 흰색 점선들은 각각 $f_{ \Delta t \approx 0}$, V_{CNP} , $V_{\Delta\phi, \text{max}}$ 를 나타낸다.	22
그림 3.2.2 주파수 1.25 THz에서의 $\Delta\phi$ 수치적 계산 결과 및 측정 결과 비교.	22
그림 3.3.1 이중층 그래핀 마이크로 리본으로 제작된 그래핀 메타표면의 실험적으로 측정된 (a) $ \Delta t $ 및 (b) $ \Delta\phi $ 의 결과.	24
그림 3.3.2 1.25 THz에서 ΔV 의 함수로 표시된 이중층 그래핀 메타표면의 $\Delta\phi$	24
그림 3.4.1 푸앵카레 구에 표현된 편광 상태의 변화. (a) 단층 및 (b) 이중층 그래핀으로 제작된 그래핀 메타표면의 실험적으로 추출된 편광 상태 및 수치적으로 계산된 편광 상태.	26
그림 3.4.2 $V_g = -1.2 \text{ V}$ 의 경우 타원율 $\chi \geq 0.98$ 인 편광 상태가 나타나는 주파수.	26

그림 3.5 메타표면 간의 x축 간격에 그래핀이 추가로 결합된 이중층 그래핀 메타표면의 (a) 투과 진폭 및 (b, d) 위상의 수치적 계산 결과. (c, e) 0.70 THz에서의 편광 상태.	28
그림 3.6 주파수 및 게이트 전압에 따른 (a) 단일 그래핀 및 (b) 그래핀 메타표면의 실험적으로 측정된 주파수에 따른 투과 및 반사 진폭	30
그림 3.7.1 (a) 그래핀 및 (b) GMBS의 게이트 전압에 대한 수치적 계산 결과 및 측정 진폭 비교.	32
그림 3.7.2 게이트 전압에 따른 0.5 THz에서의 (a) 그래핀 및 (b) GMBS의 투과 및 반사 진폭.	32
그림 3.8 상용 빔 분할기 및 그래핀 메타표면을 통해 (a) 투과 및 (b) 반사된 테라헤르츠의 시간 영역 파형.	34
그림 3.9 패브리-페로 공진을 보여주는 상용 빔 분할기 및 (b) 그래핀 메타표면에 대한 투과 및 반사 진폭.	34

제 1장 서론

1.1 연구배경

1.1.1 테라헤르츠파

테라헤르츠파(THz-wave)는 전자기 스펙트럼에서 전기적(Electronics) 영역과 광학적(Optics) 영역 사이에 위치하며, 0.1~10 THz 주파수 영역에 해당한다. 따라서, 테라헤르츠파는 전파와 광파의 특성을 동시에 갖추고 있어 다양한 응용 분야에서 중요한 역할을 한다. 또한, 상대적으로 낮은 에너지를 가지고 있어 비접촉 및 비파괴 측정에 적합하며[1], 생체 의료 검사[2], 위험 물질 감지[3] 뿐만 아니라, 물질의 역학 분석, 생체 분자 검출 등을 포함한 분광학, 차세대 무선 통신 등 다양한 응용 분야에 활용되고 있다[4-7].

물질과 소자의 전자기 반응은 입사 전자기파의 투과 및 반사, 그리고 편광 상태에 의존하기 때문에 전자기파의 편광 제어 및 검출, 정밀한 빔 분할 제어는 광범위한 분야에서 필수적인 역할을 한다. 테라헤르츠 주파수 범위에서 전자기파의 편광 상태는 일반적으로 직교 주축을 따라 굴절률이 서로 다른 복굴절 물질[8, 9]을 통해, 그리고 빔 분할은 높은 임피던스를 갖는 실리콘 웨이퍼(Hi-Z Si)를 사용하여 조작되어 왔다[10]. 복굴절은 결정 내의 원자 배열이 비대칭을 이루고 있는 비등방성 특성으로 인해 하나 이상의 굴절률이 발생하며[11], 방해석 결정은 복굴절 특성이 나타나는 대표적인 천연 물질 중 하나이다[12]. 그러나, 테라헤르츠 영역에서는 복굴절이 강한 천연 물질은 현저히 부족하며, 상대적으로 긴 파장으로 인해, 요구되는 위상 지연을 얻기 위해서는 상당히 긴 전파 길이가 필요하여 실용적인 편광 구성요소나 소자의 실현에 제약이 있었다. 또한, 실리콘 웨이퍼는 수백 마이크로미터의 두께로 광학적 측면에서 충분히 두껍기 때문에 패브리-페로(Fabry-Pérot) 효과에 의한 파형 복제 및 스펙트럼 변형이 야기되며[13], 이로 인해 광대역 주파수에서의 빔 분할기 적용이 제한되었다. 최근, 설계에 따라 다양한 광학적 특성을 나타내며 수 마이크로미터 크기로 제작 가능한 금속 메타물질을 적용하여 이러한 문제를 극복하기 위한 시도들이 활발히 진행되고 있다.

1.1.2 테라헤르츠 메타표면 소자 및 연구 현황

테라헤르츠 영역에서 메타물질은 매우 중요한 역할을 하고 있다. 특히, 2차원 평면 구조 배열인 메타표면은 자유롭고 다양한 설계 및 구성 방식을 통해 유망한 플랫폼으로 주목받고 있으며 [14-21], 테라헤르츠 소자의 성능을 크게 향상시켰다. 그러나, 한 번 제작된 메타표면의 광학적 특성은 변조가 불가능한 제약이 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해 능동형 메타표면의 개념이 제시되었으며 [22-26], 이는 빛과 메타 원자 간의 상호 작용을 능동적으로 조절할 수 있는 새로운 방식을 제공한다.

능동형 메타표면은 빛, 전기적 신호, 열 등과 같이 외부 자극에 따라 광학적 특성이 실시간으로 변조될 수 있는 물질과 결합함으로써 실현될 수 있다. 최근 연구에서는 액정 [27] 또는 바나듐 산화물 (VO_2) [28], 그래핀 [29] 등을 활용하여 다양한 광학적 성질을 효과적으로 조절할 수 있는 능동형 테라헤르츠 소자가 보고되었다(그림 1.1). 뿐만 아니라, 기관에 반강자성체 [30] 또는 금속 코팅을 적용하여 빔 분할 비율을 수동적으로 제어하는 개념 또한 제안되었다 [31]. 이러한 연구와 개발은 테라헤르츠 영역에서 메타표면의 응용을 확장할 수 있는 가능성을 제시하고 있으며, 이를 통해 다양한 응용 분야에서 소자의 성능 향상과 새로운 응용 가능성을 기대할 수 있다.

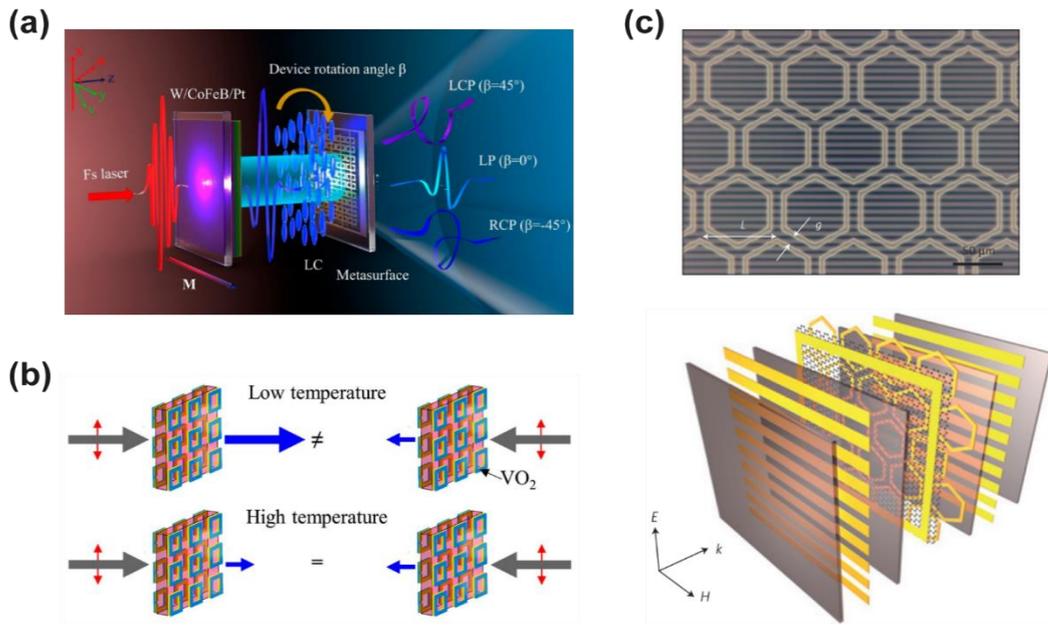


그림 1.1 능동형 메타표면 선행 연구. (a) 액정과 결합된 메타표면 [27]. 펨토초 레이저를 W/CoFeB/Pt에 조사하여 발생된 테라헤르츠파의 편광 상태를 액정의 정렬 상태에 따라 조절함. (b) 바나듐 산화물과 결합된 메타표면 [28]. 온도에 따라 절연체-금속 상이 변하는 바나듐 산화물과 결합하여 광다이오드 현상을 조절함. (c) 그래핀과 결합된 메타표면 [29]. 전기적으로 광전도도 조절 가능한 그래핀과 결합하여 투과도와 위상을 조절함.

1.1.3 그래핀의 광학적 특성

2차원 탄소 동소체인 그래핀은 탄소 원자들이 육각형 모양의 벌집 구조로 배열되어 있는 견고하고 유연한 물질이다. 그래핀은 일반적인 금속 및 반도체와는 달리 체로 밴드갭을 가지고 있으며 [32, 33], 페르미 준위의 이동에 따라 광전도도를 조정할 수 있다 [34, 35]. 특히, 테라헤르츠 영역에서 그래핀은 밴드 내 (Intraband) 전이를 통해 걸어주는 전압에 따라 광전도도를 연속적으로 조절할 수 있다 [36-40]. 이러한 그래핀을 공진 특성을 가진 메타표면과 결합하여, 빛의 진폭 및 위상, 공진 주파수, 편광과 같은 특성을 능동적으로 조절할 수 있음이 보고되었다 [41-46].

게이트 전압에 따라 변조되는 그래핀의 광전도도는 쿠보 공식(Kubo formula)에

의해 모델링되며, 간단하게 $\sigma(\omega) = \sigma_{\text{intra}}(\omega) + \sigma_{\text{inter}}(\omega)$ 로 표현된다. 테라헤르츠 영역에서는 밴드 내 전이 $\sigma_{\text{intra}}(\omega)$ 가 우세하며 복소 전도도의 수식은 참고 문헌 [47]에 상세히 설명되어 있다. 또한, 그래핀은 상태 밀도가 사라져야 하는 제로 밴드갭에서 최소 광전도도가 나타난다[48]. 그림 1.2는 쿠보 공식을 통해 얻어진 페르미 준위 E_F 에 따른 0.2 ~ 2.8 THz에서 광전도도 σ 와 직류(DC) 전도도를 나타낸다. 여기서 밴드 내 산란 시간 $\tau = 39$ fs라고 가정하였으며, 테라헤르츠 영역에서 그래핀의 광전도도가 선형적으로 변조됨을 볼 수 있다.

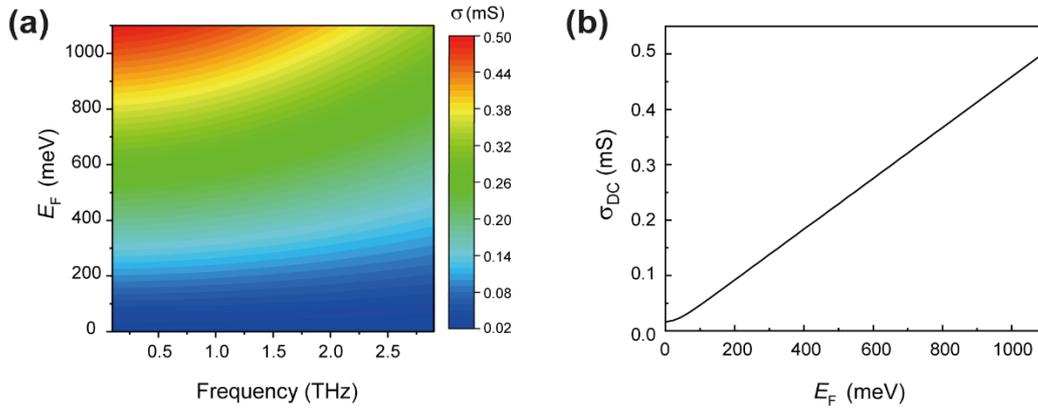


그림 1.2 페르미 준위 E_F 의 변화에 따른 수치적으로 계산된 광전도도. (a) 주파수에 따른 광전도도 및 (b) DC 전도도.

1.2 연구 목적

본 연구의 목적은 그래핀과 메타표면을 결합하여 전기적 신호로 테라헤르츠파의 광특성을 능동적으로 조절할 수 있는 테라헤르츠 소자의 구현 가능성을 제안하는 것이다. 먼저, 편광 상태를 조절할 수 있는 위상 지연자를 구현하고자 한다. 능동형 위상 지연자는 등방성을 갖도록 설계된 메타표면의 한쪽 방향에만 단층 또는 이중층으로 이루어진 대면적 그래핀을 패터닝하여 구현한다. 패터닝된 그래핀의 광 전도도를 게이트 전압을 통해 변조함으로써, x와 y축 중 한 축의 유효 굴절률을 효과적으로 제어할 수 있다. 이는 인접한 메타 원자 사이의 좁은 간격으로 인한 용량성 결합을 약화시키면서 얻어지는 결과이다. 그 결과, 입사되는 선형 편광 상태의 테라헤르츠파가 소자를 투과한 후 원형 편광 상태로 변환된다. 또한, 전기적으

로 제어 가능한 넓은 주파수 영역에서 투과와 반사 분할 비율을 능동적으로 조절할 수 있는 빔 분할기를 구현하고자 한다. 넓은 주파수 영역에서 동작하는 메타표면은 공진 주파수를 높은 주파수에 위치시켜 구현하고 분할 비율은 그래핀의 광전도도 조절을 통해 구현한다. 전산모사를 통해 얻어진 계산 결과를 바탕으로 메타표면을 미세 전기 기계 시스템 (Micro Electro Mechanical Systems, MEMS) 공정을 통해 제작하고 측정결과와 비교 검증한다.

제 2장 메타표면 소자 설계 및 제작

2.1 그래핀 메타표면 설계

메타표면을 구성하는 메타 원자 모양은 그림 2.1에 개략적으로 나타낸 것처럼 두 개의 H 모양이 직교 상태로 겹쳐져 있다. 이는 x축과 y축을 따라 인접한 메타 원자 사이에 좁은 간격을 가져 강한 용량성 결합(Strong Capacitive Coupling)을 가지며, 메타 원자의 크기와 각 간격 사이의 길이가 일정함으로써 등방성 메타표면을 형성한다. 먼저, 위상 지연자의 경우, 그림 2.1(a)와 같이 패터닝된 그래핀 마이크로 리본이 y축으로 배열된 이중 H형 메타 원자 사이의 간격에 부착되며, 해당 방향을 따라 용량성 결합을 우선적으로 제어할 수 있다. 또한, 빔 분할기 메타표면의 경우 4.79 THz의 주파수에서 공진하도록 설계되었으며, 대면적 그래핀을 메타표면 전체에 덮음으로써 투과 및 반사된 테라헤르츠 빔의 분할 비율을 전기적으로 조절할 수 있게 하였다(그림 2.1(b)).

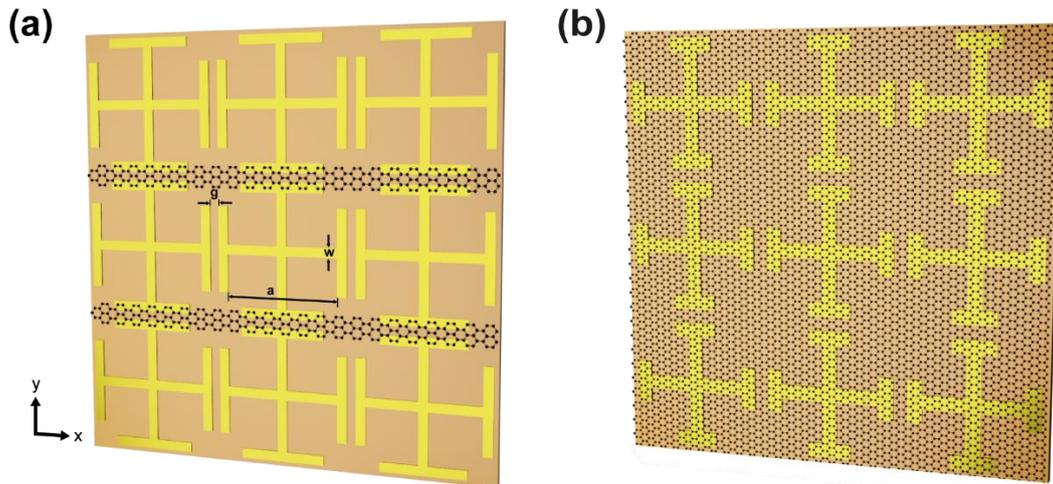


그림 2.1 이중 H 형태의 메타 원자로 구성된 (a) 위상 지연자 및 (b) 빔 분할기 그래핀 메타표면의 개략도.

2.1.1 위상 지연자

그래핀 메타표면의 설계와 투과 및 반사 특성은 상용 유한 요소법(Finite Element Method, FEM)인 CST Microwave Studio를 이용하여 전산모사하였다. 전산모사를 통해 최적화된 금(Au) 메타표면의 단위 격자(Unit cell)의 기하학적 매개변수는 $a = 24 \mu\text{m}$, $w = 2 \mu\text{m}$, $g = 2 \mu\text{m}$ 이며, 그래핀 마이크로 리본의 폭은 $6 \mu\text{m}$ 이다(그림 2.1(a)). 금에 대한 플라즈마 주파수(ω_p)는 $1.37 \times 10^{16} \text{ rad/s}$ 이고 충돌 빈도(γ)가 $4.07 \times 10^{13} \text{ rad/s}$ 인 드루드(Drude) 모델을 사용하였다[49]. 기판 역할을 하는 폴리이미드(Polyimide)의 복소 유전율은 측정값을 바탕으로 $3.284 - j0.144$ 로 계산하였다.

그래핀은 광전도도를 조절함으로써 유효 굴절률을 제어할 수 있다[50]. 이를 통해 대면적 그래핀을 패터닝하여 제작된 그래핀 마이크로 리본을 메타 원자 사이의 한 축에만 결합하면, 한 축에 따른 유효 굴절률을 광학 전도도에 따라 효율적으로 조정 가능하다. 광전도도는 게이트 전압(V_g)에 의해 제어됨에 따라, 입사하는 테라헤르츠 편광파는 x축을 따라 결합된 그래핀 메타표면을 투과한 후 y 성분 편광이 변경될 수 있다. 제안된 메타표면의 게이트 제어 이방성은 다음과 같이 존스 행렬 방정식 내에서 현상학적으로 모델링 될 수 있다.

$$T = \begin{bmatrix} t_x e^{j\phi_x} & 0 \\ 0 & t_x e^{j\phi_y(V_g)} \end{bmatrix}$$

위상의 y 성분만 게이트 전압의 함수로 가정되며, 이는 동작 주파수에서 적용될 수 있다. 그래핀은 전하 중성점 (Charge Neutral Point, CNP) 에서 최소 전도도가 나타나기 때문에 제안된 메타표면은 전하 중성점에서 거의 등방성 상태를 유지한다. 이 경우, y 축으로 배열된 이중 H형 메타 원자 사이의 좁은 간격에 강하게 집중된 전기장은 그대로 유지되며, 선형 편광으로 입사한 테라헤르츠파가 메타표면을 투과하여도 원래의 편광 상태를 유지하는 것을 확인할 수 있다(그림 2.2(a)). 반면, 게이트 전압이 최대 ($V_{g,max}$) 로 인가되면 그래핀의 페르미 준위 (E_F) 가 증가함에 따라 전도도가 증가하며 금속의 좁은 간격을 연결시켜주는 역할을 한다. 그 결과, 용량성 결합이 약화되어 유전율이 감소하고 굴절률이 작아져 메타표면의 이방성이 커지게 된다. 굴절률 차이로 인한 이방성의 정도는, x 와 y 축의 위상이 지연되는 정도인 $\Delta\phi = \phi_x - \phi_y$ 로 나타낼 수 있으며, 두 축의 투과 진폭이 같을 경우 ($|t_x| = |t_y|$) 위상 지연이 90도일 때, 선형 편광된 입사파를 원형 편광 투과파로 변환시킬 수 있다(그림 2.2(b)). 따라서, 그래핀에 걸어주는 게이트 전압에 따라 편광 상태가 변경되며, 이는 능동형 테라헤르츠파장관 구현이 가능함을 의미한다.

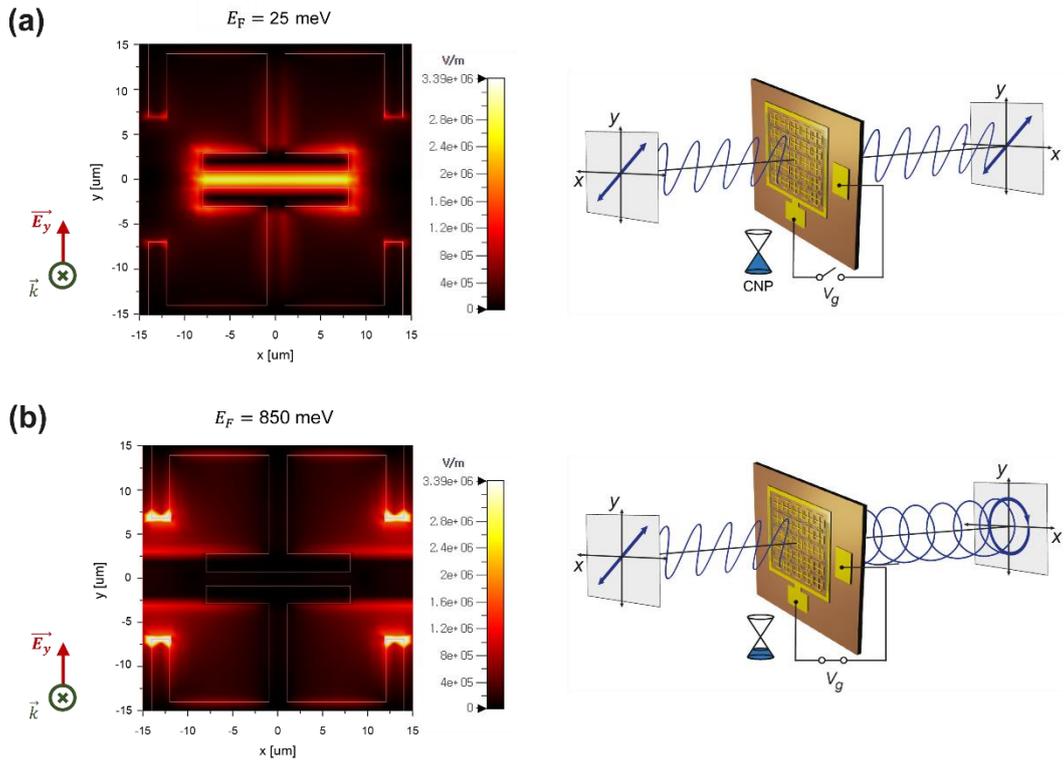


그림 2.2 (a) 그래핀의 페르미 준위가 전하 중성점인 경우와 (b) 게이트 전압 V_g 을 인가한 경우 메타표면의 금속 좁은 겹에 집속된 전기장 분포와 그때 투과된 테라헤르츠파의 편광 상태.

2.1.1.1 위상 지연 계산

그림 2.2.1은 페르미 준위가 $E_{F,CNP} = 0 \text{ meV}$ 와 $E_{F,max} = 700 \text{ meV}$ 를 갖는 그래핀 메타표면을 통해 x 및 y 방향으로 편광된 테라헤르츠파의 투과 진폭(t_x, t_y) 및 위상(ϕ_x, ϕ_y)의 전산모사 결과를 보여준다. x 및 y 편광파는 각각 검은색 실선과 빨간색 실선으로 표시되었다. 그림 2.2.1(a, b)는 그래핀의 페르미 준위가 전하 중성점 근처로 설정되어 있지만, 두 직교 편광의 투과 진폭과 위상에서 약간의 불일치가 관찰된다. 이러한 차이는 하전된 불순물 산란(Charged Impurity Scattering)에 따라 전하 중성점임에도 불구하고 그래핀이 갖는 전도도 때문이다[51, 52]. y 편광 입사파에 대한 그래핀 메타표면의 공진 주파수는 그래핀의 전도도가 증가함에 따라 적색 편이(Red shift) 되었지만, x 편광 입사파에 대해서는 변화가 없음을 보인다(그림 2.2.1(c)).

원형 편광의 조건인, 두 편광파의 투과 진폭 차이는 없으면서 위상 차이는 90° 인 조건을 찾기 위해, $|\Delta t| = |t_x - t_y|$ 및 위상 지연인 $\Delta\phi = \phi_x - \phi_y$ 를 E_F 의 함수로 표시하였다(그림2.2.2). 빨간색 점선으로 표시된 1.10 THz의 주파수에서, $|\Delta t|$ 가 거의 0인 상태로 $\Delta\phi$ 이 연속적으로 변조될 수 있음을 확인할 수 있다. 최대 위상 지연 $\Delta\phi = 81^\circ$ 는 페르미 준위 $E_F = 700$ meV일 때 달성된다. 이러한 계산 결과는 그래핀 마이크로 리본의 광학 전도도를 변화시킴으로써 투과되는 테라헤르츠파의 편광 상태를 효율적이고 연속적으로 변조할 수 있음을 보여준다.

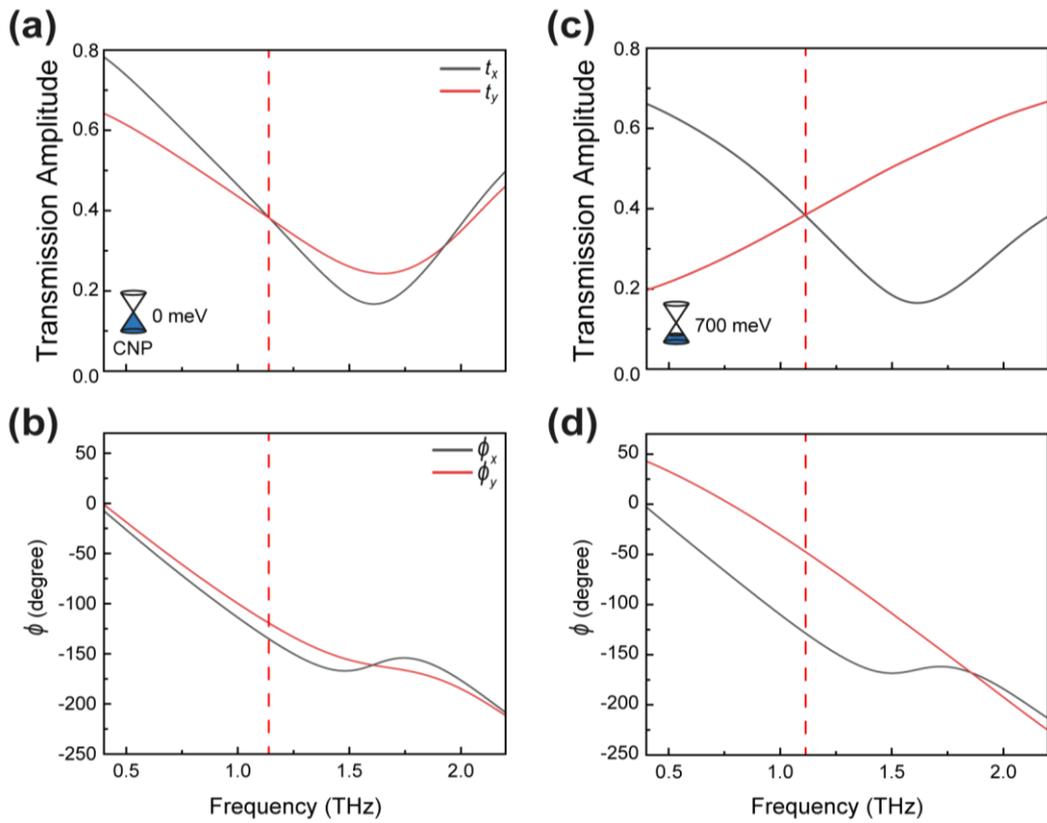


그림 2.3.1 패터닝된 그래핀의 페르미 준위가 (a, b) $E_{F,CNP} = 0$ meV 일 때와 (c, d) $E_{F,max} = 700$ meV 일 경우 투과 진폭 t_x, t_y 와 위상 ϕ_x, ϕ_y .

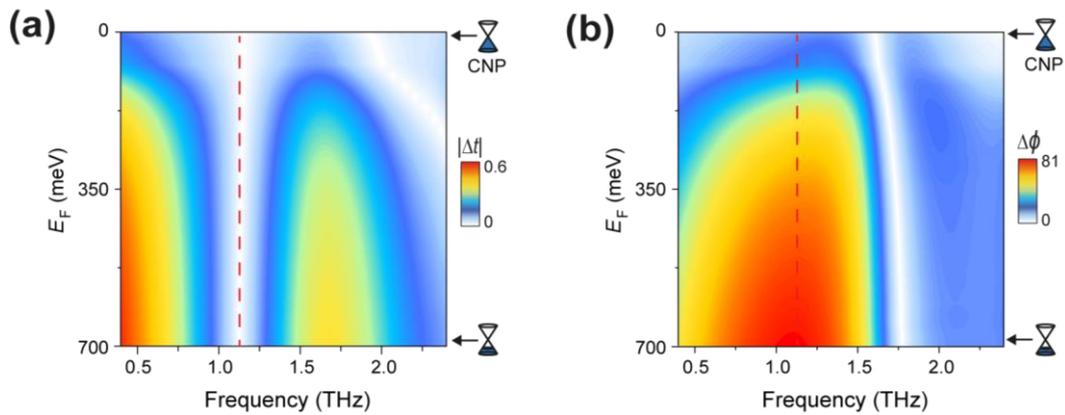


그림 2.3.2 페르미 준위와 주파수의 함수로 그려진 (a) 투과 진폭 $|\Delta t|$ 및 (b) 위상 지연 $\Delta\phi$ 의 차이.

2.1.2 빔 분할기

앞서 언급한 CST Microwave Studio를 통해 그래핀 메타표면의 특성을 수치적으로 조사한다. 빔 분할기 메타표면을 구성하는 메타 원자의 기하학적 매개변수는 $U = 20 \mu\text{m}$, $L = 18 \mu\text{m}$, $w = 2 \mu\text{m}$, $a = 6 \mu\text{m}$ 이며, 간격 폭 ($U - L$)은 $2 \mu\text{m}$ 이다(그림 2.4.1(a)). 금속 메타 원자는 강한 용량성 결합이 나타나며, 그래핀이 없는 메타표면은 그림 2.4.1(b)와 같이 4.79 THz에서 공진 주파수를 갖는다.

금속 메타표면에 부착된 대면적 그래핀의 페르미 준위를 조절함으로써(그림 2.4.2(a)), 그래핀 메타표면의 유효 전도도를 조절할 수 있다. 그래핀 메타표면을 제어하기 위해 기판 상에는 두 개의 금속 평면 전극이 패터닝되며, 그래핀에 게이트 전압이 인가된다(그림 2.4.2(b)). 이는 투과 및 반사로 분할된 테라헤르츠 빔 비율을 전기적으로 제어 가능하게 한다. 메타표면의 기판으로 작용되는 폴리이미드 기판은 원하는 주파수 범위 내에서 패브리-페로 효과를 최소화하기 위해 $1 \mu\text{m}$ 의 매우 얇은 두께를 가진다. 게이트 유전체로서 이온 겔을 사용하여 상대적으로 낮은 수 볼트 수준의 게이트 전압으로 도핑 레벨을 충분히 조절할 수 있다[53].

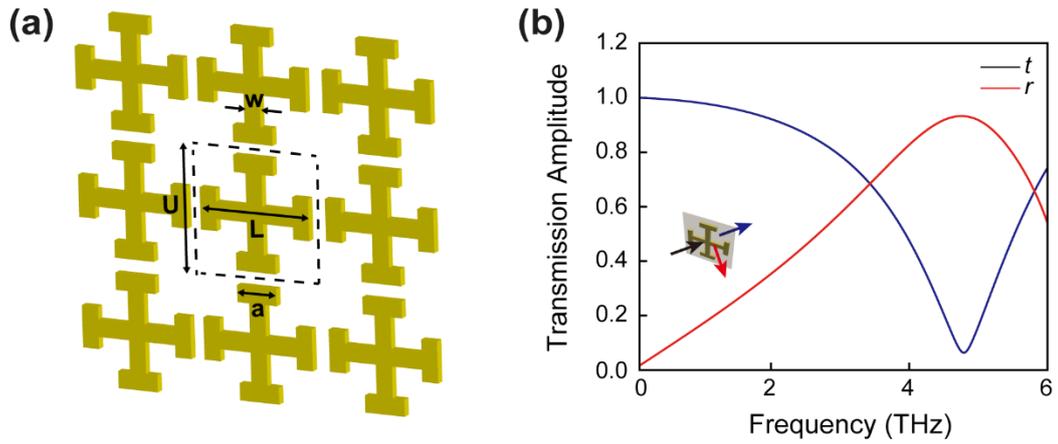


그림 2.4.1 (a) 빔 분할기 메타표면의 메타 원자 개략도. (b) 4.79 THz에서 공진하는 메타표면의 수치적 계산 결과.

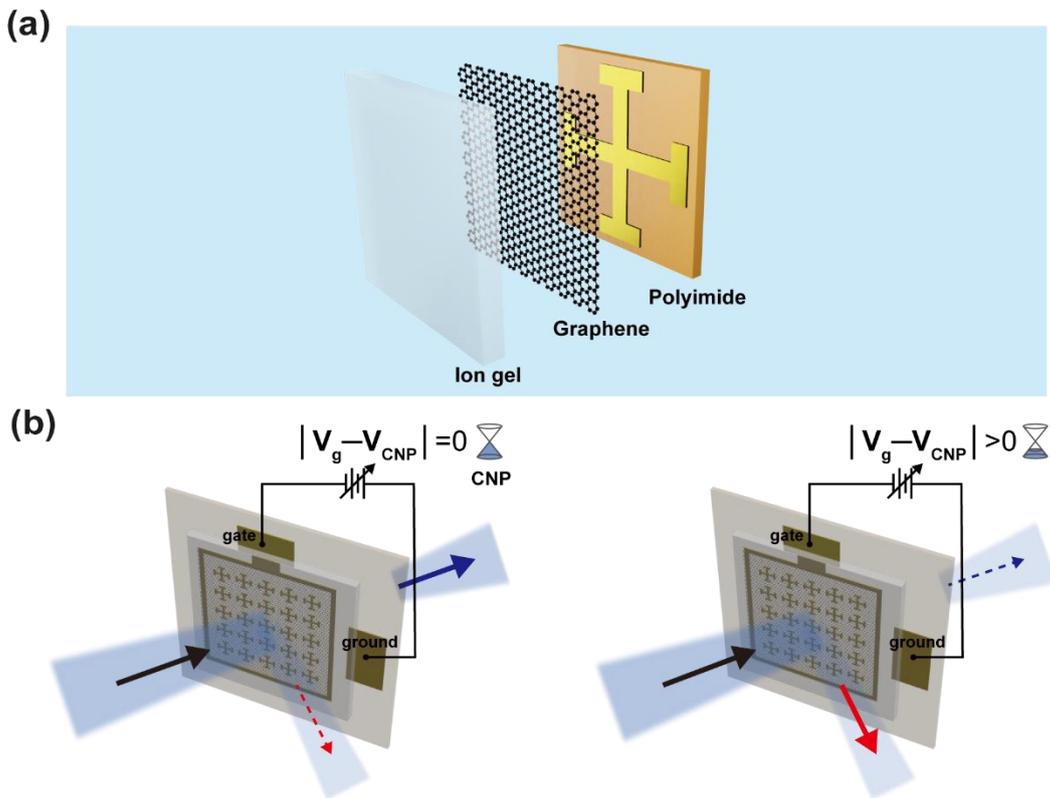


그림 2.4.2 (a) 그래핀 메타표면 빔 분할 소자 개략도. 낮은 전압 인가를 위해 이온 겔을 적용하였다. (b) 평면 금속 전극을 통해 게이트 전압을 인가함으로써 테라헤르츠 빔 분할 비율 조절이 가능하다.

2.1.2.1 단층 그래핀과 그래핀 메타표면의 비교

빔 분할기 응용을 위한 그래핀 메타표면 구조의 이점을 입증하기 위해, 먼저 페르미 준위와 주파수에 따라 게이트 전압이 인가된 단층 그래핀의 투과 및 반사 진폭을 계산하였다(그림 2.5.1(a)). 모든 계산 결과는 메타표면 구조를 45°의 비스듬한 각도로 틀어 수행되었으며, 이를 기반으로 분할된 테라헤르츠파의 투과 및 반사 계수를 얻는다.

그래핀의 전도도가 가장 낮은 전하 중성점의 경우, 그림 2.5.1(b)에서 검은색 실선으로 표시된 것과 같이 반사 없이 거의 모두 투과된다. 페르미 준위를 늘려주어 그래핀의 전도도를 높일 경우 반사도는 증가하고 투과도는 감소함을 볼 수 있다. 그러나 50:50 분할 비율을 달성하기 위해서는 페르미 준위가 1 eV를 초과해야 하며(그림 2.5.1(b), 파란색 실선), 이는 실험적으로 구현이 어려운 단점이 있다.

그림 2.5.1(c)는 그래핀 메타표면 빔 분할기(GMBS, Graphene Metasurface Beam Splitter)로 입사된 테라헤르츠파의 투과 및 반사 진폭을 페르미 준위와 주파수의 함수로 나타낸다. 이러한 계산 결과에는 두 가지 주요 특징이 나타난다. 첫째로, 전하 중성점에서 그래핀 메타표면의 투과 또는 반사 진폭은 동일한 페르미 준위에서 단층 그래핀보다 낮거나 높다. 두 번째로, 그래핀 메타표면의 경우 단층 그래핀만 적용할 경우와 달리 분할 비율 50:50을 비교적 낮은 페르미 준위로도 도달할 수 있음을 볼 수 있다(그림 2.5.1(d), 파란색 실선). 그뿐만 아니라, 페르미 준위 조절에 따라 50:50 외의 다른 비율로 빔을 분할할 수 있음도 보였다.

메타표면이 갖는 공진 주파수에 따른 빔 분할 동작 주파수를 분석하기 위해, 1.12 THz와 1.67 THz의 공진 주파수를 갖는 그래핀 메타표면의 투과 및 반사 진폭을 그림 2.5.2에 나타내었다. 낮은 공진 주파수를 갖는 그래핀 메타표면은 상대적으로 더 좁은 대역폭을 갖지만, 더 낮은 페르미 준위로 50:50 분할 비율을 달성할 수 있음을 볼 수 있다. 이는 빔 분할기 설계에서 공진 주파수 및 대역폭, 페르미 준위 등을 메타표면의 공진주파수에 따라 효율적으로 설계할 수 있음을 보여준다.

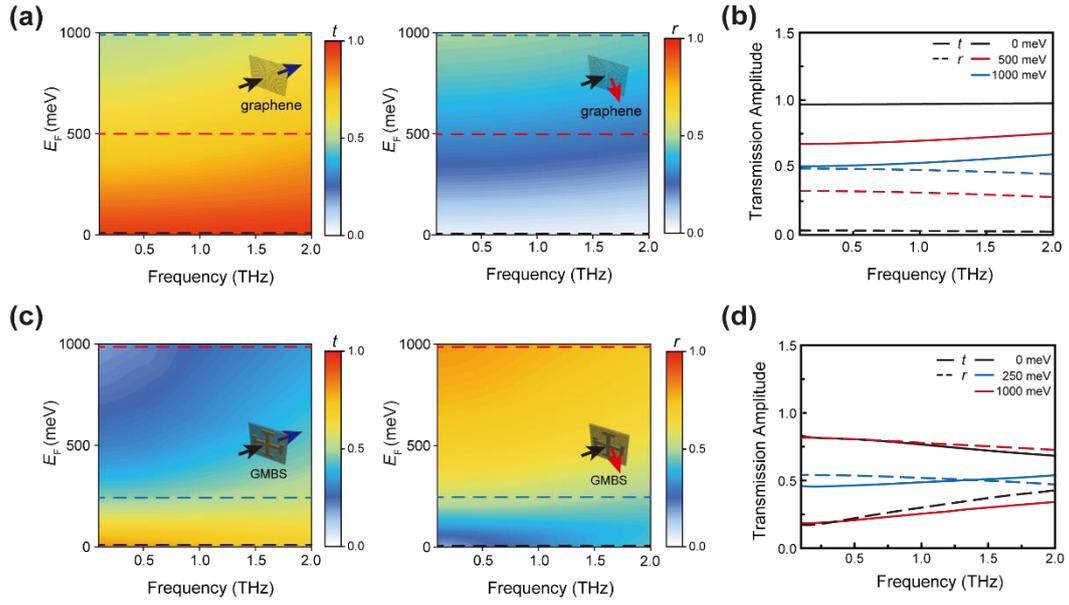


그림 2.5.1 페르미 준위의 함수로서 그려진 (a, b) 단층 그래핀만 있을 경우와 (c, d) GMBS에 대한 경우의 투과 및 반사 진폭 스펙트럼.

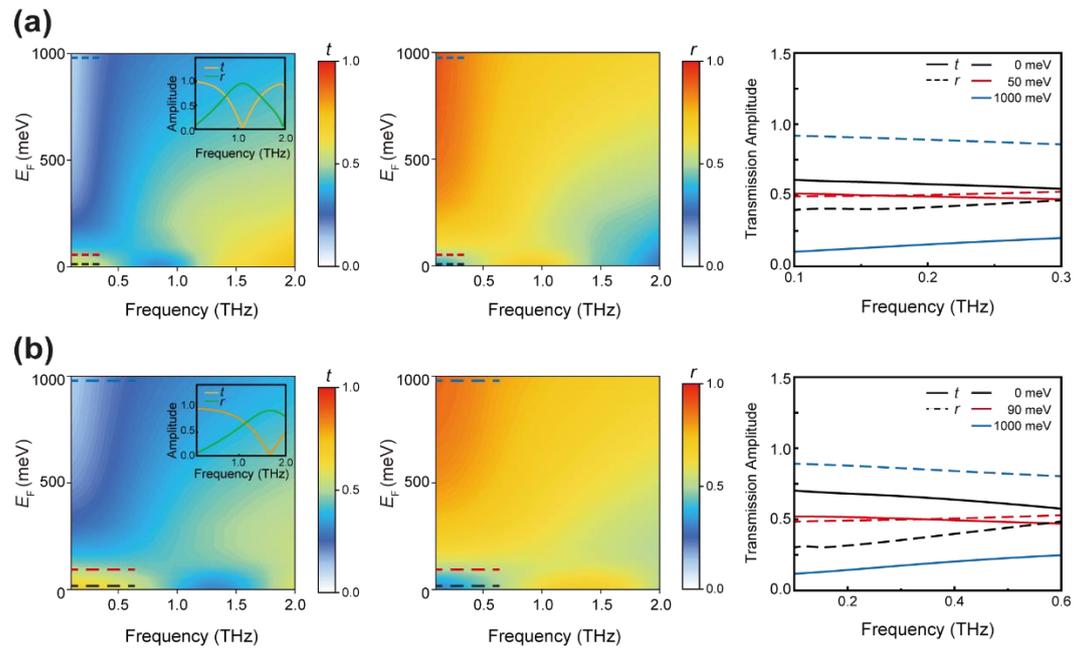


그림 2.5.2 (a) 1.12 THz와 (b) 1.67 THz의 공진 주파수를 갖는 그래핀 메타표면.

2.2 제작 공정

2.2.1 그래핀 메타표면

그래핀 메타표면은 표준 마이크로 전자 기계 시스템 (Microelectromechanical system, MEMS) 기술을 사용하여 제작하였다(그림 2.6). 먼저, 그래핀 메타표면의 기판으로 적용되는 폴리이미드 용액(PI-2610, HD Microsystems)은 실리콘 웨이퍼 위에 스핀 코팅되며, 1 μm 두께를 목표로 하였다. 이후 경화를 위해 2단계 베이킹 공정이 이어진다. 제조된 폴리이미드 층 위에 동일한 스핀 코팅 기술을 사용하여 네거티브 감광 용액(AZ nLOF 2035, MicroChem)을 도포한다. 이 감광액 층은 원하는 패턴이 새겨진 크롬 마스크를 사용하여 자외선 리소그래피를 통해 패터닝된다. 위상 지연자의 경우 20 nm 두께의 크롬 접착층과 함께 100 nm 두께의 금이 패터닝된 감광액 위에 증착되며, 빔 분할기는 크롬과 금이 각각 10 nm, 200 nm의 두께로 제작된다. 증착된 금속은 리프트 오프(Lift-off) 공정을 통해 원치 않는 금속을 제거하고, 앞서 설계한 메타 원자 구조와 게이트 전압을 인가하기 위한 전극을 형성한다. 대면적 그래핀은 구리 호일 위에 화학 증기 증착 (Chemical Vapor Deposition, CVD) 기법으로 성장된 상업용 그래핀 (GrapheneSquare사)이 사용되었다. 이 그래핀은 Wet-transfer 기술을 사용하여 구리 호일로부터 메타표면으로 전사된다. 이 과정에서 그래핀이 주름 지거나 찢어지지 않도록 보호하기 위해 그래핀 상에 PMMA (Poly(methyl methacrylate), C2, Microchem)를 코팅한다[54]. 그래핀이 메타표면으로 전사된 후 PMMA는 제거된다.

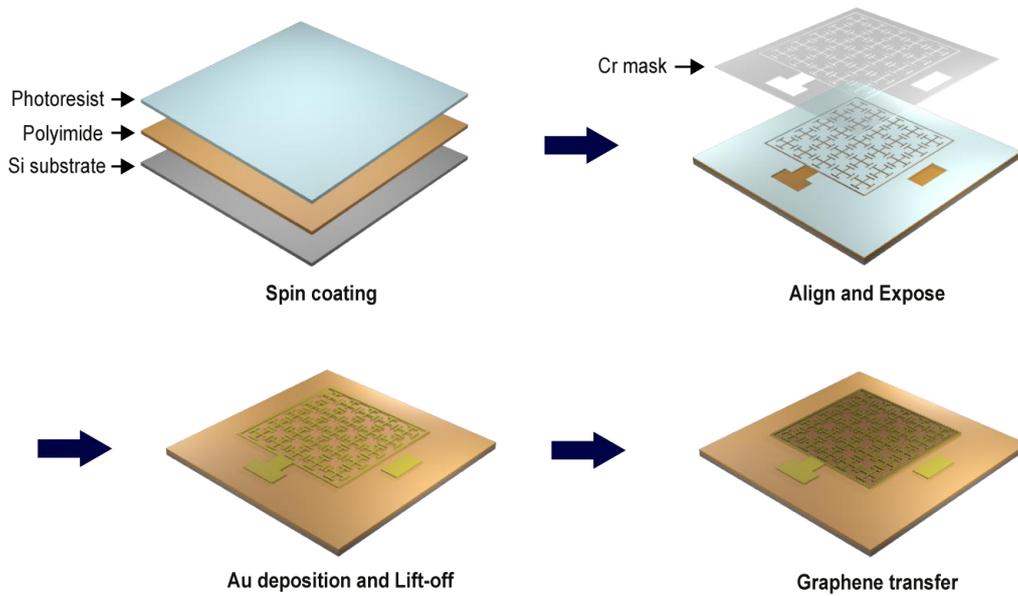


그림 2.6 그래핀 메타표면의 공정 과정 개략도.

2.2.2 그래핀 마이크로 리본 패터닝

메타표면으로 전사된 대면적 그래핀은 자외선 리소그래피에 의해 그래핀 마이크로 리본으로 패터닝된다. 패터닝을 위해 두 가지 감광액(PMGI 및 HKT 501)이 사용된다. 이러한 이중 감광액 층은 자외선 노출과 함께 패터닝이 현상된다. 이후 감광액으로 덮이지 않은 그래핀의 일부분은 산소 플라즈마 애셔에 의해 식각된다. 이 과정을 통해 그래핀이 마이크로 리본의 형태로 정밀하게 패터닝된다. 감광액은 현상액을 이용하여 제거되고 최종적으로 패터닝된 그래핀을 확인할 수 있다(그림 2.7). 감광액의 가장 위층(HKT 501)은 플라즈마로 인해 온도가 상승하여 경화될 수 있으며, 이는 샘플 제작 과정을 더 복잡하게 만든다. 따라서, 두 번째 감광액(PMGI) 층을 통해 플라즈마 노출로부터 보호한다. 이는 경화를 방지할 뿐만 아니라 감광액 제거에도 용이하다. 패터닝된 그래핀 마이크로 리본의 양 끝은 사각형 링 모양의 게이트 전극과 연결되어 있으며, 게이트 전압이 인가됨에 따라 그래핀의 전도도는 변조된다. 이를 통해 이웃하는 메타 원자 사이의 좁은 간격에 집중되는 전기장을 효과적으로 제어할 수 있다.

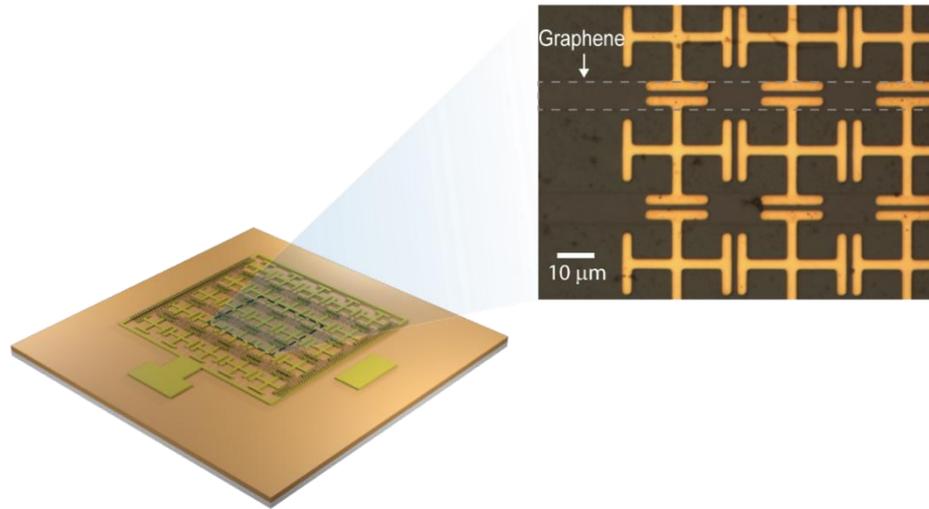


그림 2.7 제작된 그래핀 마이크로 리본의 개략도 및 현미경 사진.

2.2.3 유전체 이온 겔

그래핀의 페르미 준위를 낮은 전압으로 조절하기 위해 이온 겔(Ion-gel) 게이트 유전체를 사용한다. 이온 겔은 Cut and stick 방식을 사용하여 얻을 수 있으며 [53], 이를 통해 10 μm 두께의 이온 겔을 제작한다. 이온화된 용액 [EMI] [TFSA] (SigmaAldrich)와 중합체 P(VDF-HFP(SigmaAldrich))를 혼합함으로써 이온 겔 용액이 제조되며, 이 용액은 건조 및 경화 과정을 통해 겔 형태로 완성된다. 완성된 이온 겔은 모든 전극과 대면적 그래핀 및 그래핀 마이크로 리본에 전사되며(그림 2.8(a)), 테라헤르츠 주파수에서 거의 투명한 특성을 갖는다. 게이트 전압이 전극을 통해 인가되면, 이온 겔 내의 이온 밀도는 달라진다. 이로 인해 그래핀의 도핑 농도를 변경할 수 있다[55]. 다음으로, 유연한 폴리이미드 필름 층을 실리콘 웨이퍼로부터 분리하고, 기계적 안정성을 위해 그림 2.8(b)와 같이 중앙에 원형 구멍이 있는 PCB(Printed Circuit Board) 기판에 전사 및 부착함으로써 그래핀 메타표면 소자가 완성된다(그림 2.6.2(b)).

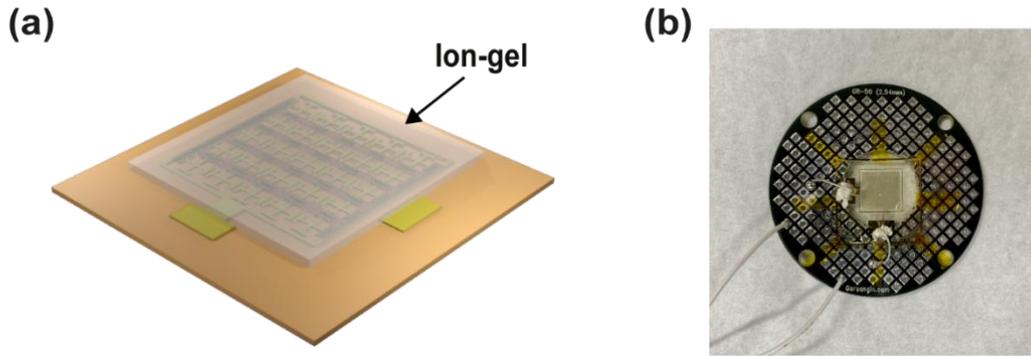


그림 2.8 (a) 그래핀 및 전극 상에 전사된 이온 겔. (b) PCB 기판에 부착된 그래핀 메타표면.

제 3장 실험 및 결과

3.1 테라헤르츠 시간 영역 분광법 실험 장치를 이용한 그래핀 메타표면 소자 측정

그래핀 메타표면은 투과된 테라헤르츠파의 진폭 및 위상에 대한 정보를 제공하는 테라헤르츠 시간 영역 분광법(THz-TDS)을 통해 측정된다. 테라헤르츠 파형은 펨토초 광섬유 레이저를 통해 테라헤르츠 광전도 안테나(PCA, BATOP)를 여기 시킴으로써 생성된다. 생성된 테라헤르츠 신호는 0.1~2.5 THz의 스펙트럼 범위를 갖는다. 위상 지연자의 경우 두 개의 와이어 그리드 테라헤르츠 편광판을 사용하여 편광 검출의 정밀도를 높였다(그림 3.1(a)). 반면, GMBS 소자는 입사하는 테라헤르츠 빔의 방향에 대해 45° 각도로 배치되며 PCA에 의해 생성된 테라헤르츠 빔의 초점이 빔 분할기에 형성되게 하기 위해 빔의 경로를 따라 초점 거리가 50 mm와 100 mm인 렌즈 두 개가 직렬로 배치되었다(그림 3.1(b)). 수신 안테나는 레일에 장착되어 샘플 위치에 대해 각도 θ 만큼 회전할 수 있다. 이 구성을 통해 0° 및 90° 각도에 대한 테라헤르츠 빔의 투과 및 반사를 측정할 수 있다. 모든 측정은 테라헤르츠 빔이 수증기에 흡수되는 것을 방지하기 위해 측정 내부의 습도를 4.7%로 유지하여 진행된다.

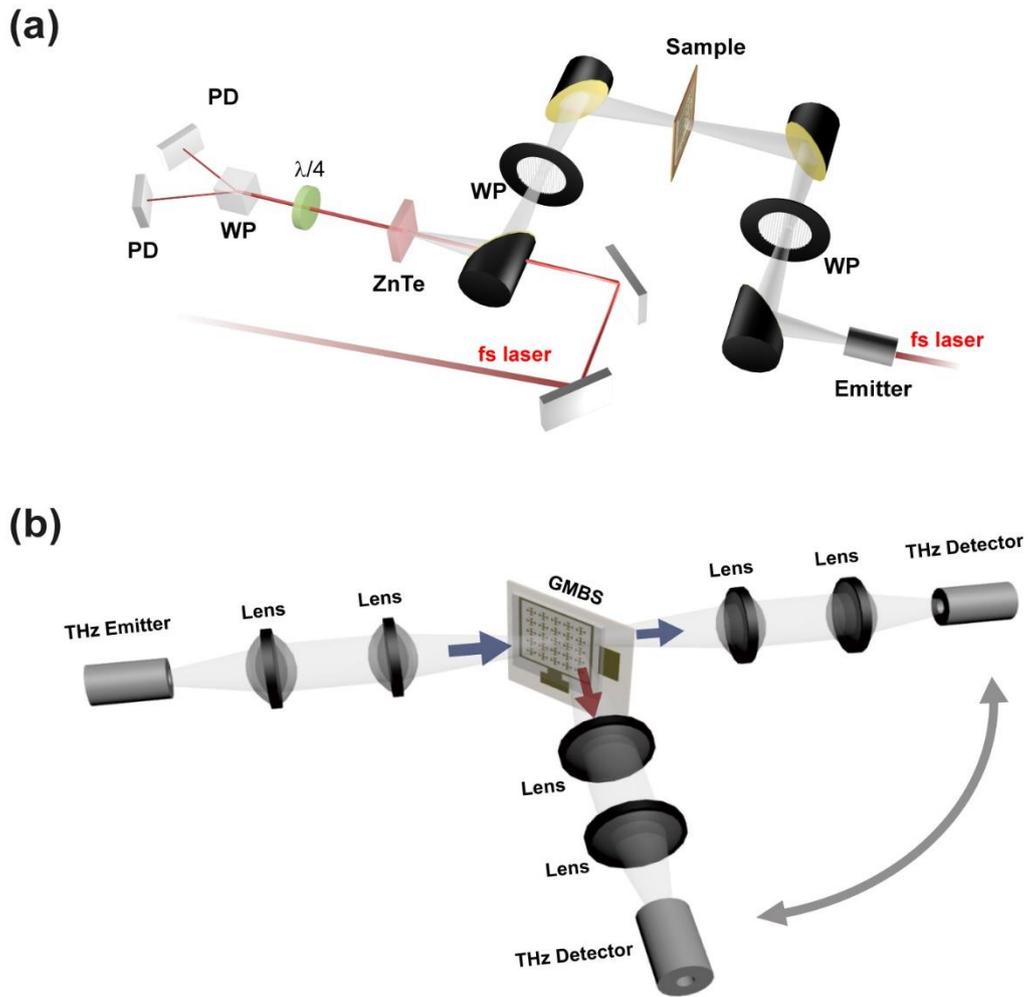


그림 3.1 THz-TDS 구성의 개략도. (a) 위상 지연자의 편광을 측정하기 위한 와이어 그리드 편광판(WP)이 설치된 셋업과, (b) 빔 분할기의 투과와 반사를 측정하기 위한 렌즈를 이용한 측정 셋업.

3.2 실험결과

3.2.1 위상 지연자

3.2.1.1 단층 그래핀 메타표면

게이트 전압에 따른 편광 상태 제어의 측정 결과는 주파수에 따른 $|\Delta t|$ (그림 3.2.1(a)) 및 $|\Delta \phi|$ (그림 3.2.1(b))로 나타내었다. 그림 3.2.1(a)에서 볼 수 있듯이, 전하 중성점에 해당하는 게이트 전압 V_{CNP} 는 검은색 점선으로 표시된 곳인 약

1.6 V로 추정된다. 빨간색 점선으로 표시된 $f_{|\Delta t| \approx 0} = 1.25$ THz의 주파수에서, 투과 차이 $|\Delta t|$ 는 게이트 전압의 변화와 무관하게 거의 0이 되며, 이 주파수에서 게이트 전압의 변화와 함께 상대적인 위상 변조 $\Delta\phi$ 가 가장 크게 나타나는 것을 확인하였다. 1.25 THz에서 최소 $\Delta\phi$ 는 15° 로 측정되는데, 위상 차이가 0이 아닌 원인은 잔류 캐리어 도핑 때문이다. 이에 따라 최소 전도도 값이 0이 아닌 점이 발생한다[56].

그림 3.2.2는 측정된 상대 위상 지연 값을 $f_{|\Delta t| \approx 0} = 1.25$ THz의 주파수에서 전하 중성점의 값의 기준이 되는 게이트 전압의 함수 $\Delta V = |V_g - V_{\text{CNP}}|$ 을 계산 결과와 비교한 그래프이다. $\Delta V = 4.1$ V에서, 최대 상대 위상 지연 $\Delta\phi_{\text{max}} = 81^\circ$ 를 얻었으며, 그 값은 사분 파장 위상 지연에 필요한 90° 위상 지연에 도달하지 못하였다. 이는 단층 그래핀의 제한된 전도도의 값과 상업용 그래핀의 상대적으로 짧은 밴드 내 산란 시간 τ 에 의한 결과이다[29].

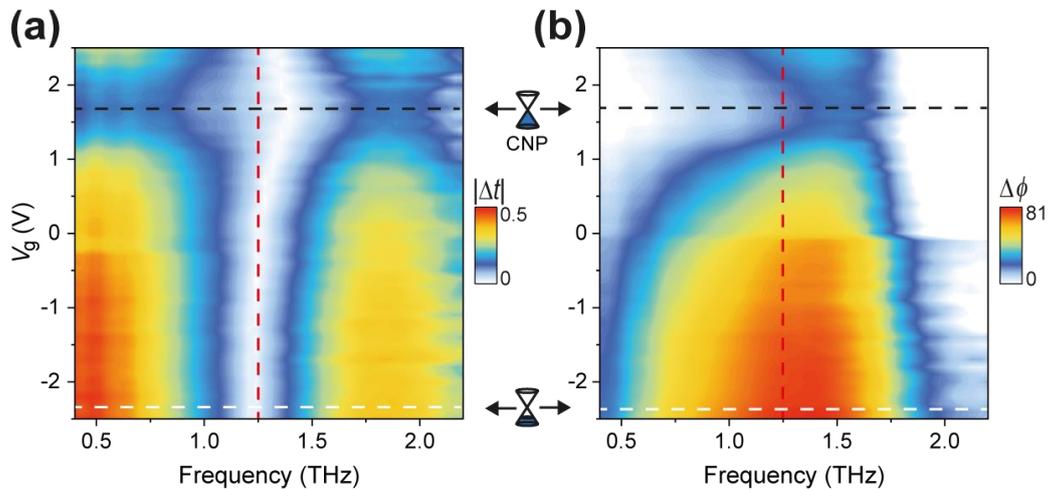


그림 3.2.1 단층 그래핀 마이크로 리본으로 제작된 그래핀 메타표면에서의 실험적으로 측정된 (a) $|\Delta t|$ 및 (b) $|\Delta\phi|$ 의 결과. 검은색, 빨간색, 흰색 점선들은 각각 $f_{|\Delta t| \approx 0}$, V_{CNP} , $V_{\Delta\phi, \text{max}}$ 를 나타낸다.

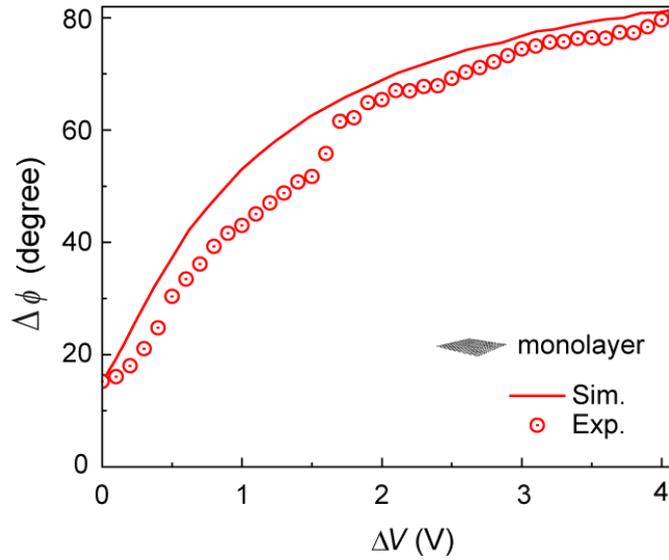


그림 3.2.2 주파수 1.25 THz에서의 $\Delta\phi$ 수치적 계산 결과 및 측정 결과 비교.

3.2.1.2 이중층 그래핀 메타표면

이중 H형 메타표면 사이의 간격을 연결하는 그래핀 마이크로 리본 채널의 전도도를 높이기 위해, 단층 그래핀보다 전도도가 더 높은 이중층 그래핀을 패터닝하여 그래핀 메타표면을 제작하였다[57, 58]. 제작된 이중층 그래핀 메타표면의 투과 및 위상 차이 측정값은 그림 3.3.1에 나타내었다. 전하 중성점은 단층 그래핀 메타표면보다 상대적으로 낮은 1.0 V(검은색 점선)에 위치하며, 단층 그래핀 메타표면의 경우와 마찬가지로 최소 $|\Delta t|$ 는 1.25 THz에서 확인되었다(빨간색 점선). 단층 그래핀 메타표면과는 다르게 90° 위상 차이를 얻을 수 있었으며, 비교적 낮은 $V_g = -1.0$ V에서 관찰되었다(그림 3.1.1 (b), 흰색 점선).

게이트 전압에 따른 1.25 THz에서 측정된 상대 위상 지연 값을 계산 결과와 비교하였다(그림 3.3.2). 초기 페르미 준위가 45 meV로 상승했음을 보여주며, 이는 이중층 그래핀 접근 방식을 검증한다. 1.25 THz에서 최소 위상 차이는 37°로 측정되며, 게이트 전압에 따라 90°의 위상 차이가 나타난다(그림 3.3.2). 이는 사분파장 위상차에 해당하며 원형 편광 상태로 변조됨을 확인할 수 있다.

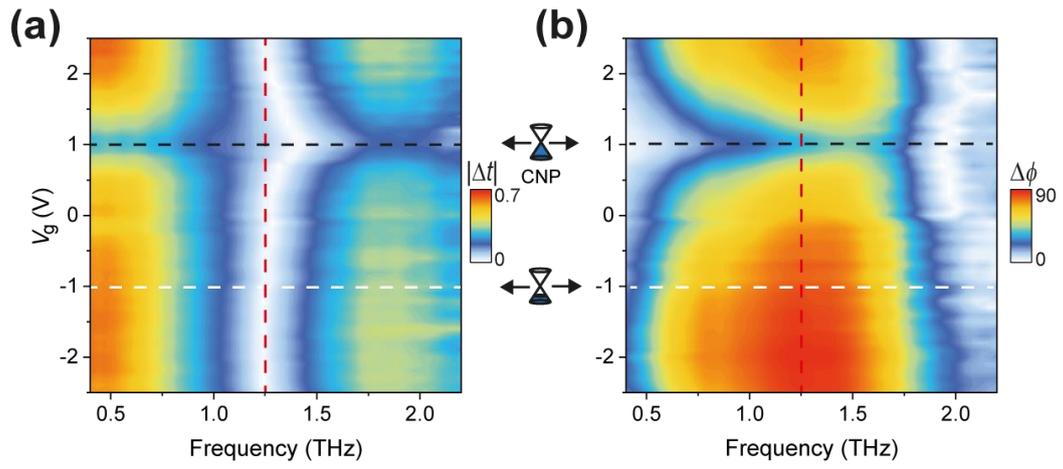


그림 3.3.1 이중층 그래핀 마이크로 리본으로 제작된 그래핀 메타표면의 실험적으로 측정된 (a) $|\Delta t|$ 및 (b) $|\Delta\phi|$ 의 결과.

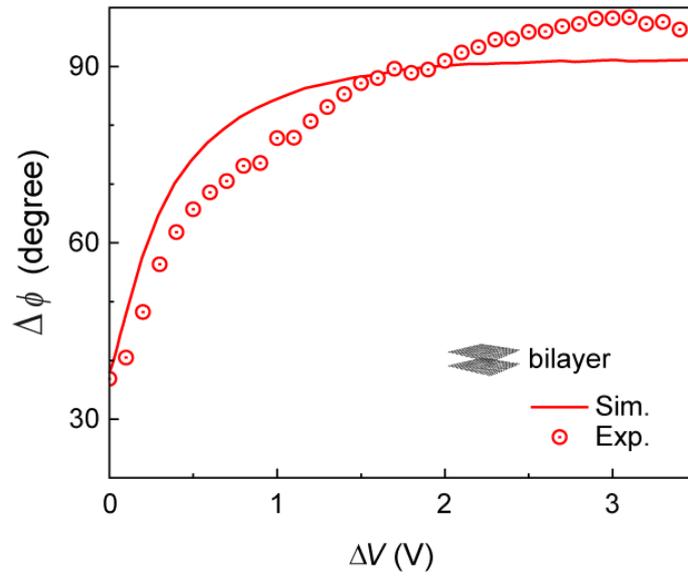


그림 3.3.2 1.25 THz에서 ΔV 의 함수로 표시된 이중층 그래핀 메타표면의 $\Delta\phi$.

3.2.1.3 편광 상태 분석

편광 상태의 변화를 직관적으로 확인하기 위해 푸앵카레 구(Poincaré sphere) 표현을 사용했다. 수치적으로 계산된 편광 상태와 실험적으로 추출된 편광 상태를 V_g 의 함수로 시각화하였다(그림 3.4.1). 여기서 스토크스 변수(Stokes parameter)는 참고 문헌 [59]에 의해 아래와 같이 주어진다.

$$S_0 = t_x^2 + t_y^2 = 1$$

$$S_1 = t_x^2 - t_y^2 = \cos 2\psi$$

$$S_2 = 2t_x t_y \cos \Delta\phi = \sin 2\psi \cos \Delta\phi$$

$$S_3 = 2t_x t_y \sin \Delta\phi = \sin 2\psi \sin \Delta\phi$$

여기서 각도 ψ 는 투과 진폭의 비율($\tan \psi = t_x/t_y$)을 나타낸다. 편광 상태는 $f_{|\Delta t| \approx 0}$ 의 주파수에서 $|\Delta V|$ 에 따라 주어지는 $\Delta\phi$ 에 의해 정의되며, 여기서 ψ 는 45° 와 동일하다. 투과된 파는 전하 중성점($|\Delta V| = 0$ V)에서 그래핀의 잔류 전도도로 인해 타원 편광이 되며, 이로 인해 단층 그래핀 메타표면의 경우 타원율($\chi = S_3/S_0$)이 0.29이고, 이중층 그래핀을 갖는 그래핀 메타표면은 타원율이 0.60로 나타났다. 단층 그래핀을 갖는 그래핀 메타표면의 경우, 게이트 전압의 증가와 함께 타원율을 0.98까지 향상시킬 수 있지만 완전한 원형 편광 상태인 $\chi = 1$ 에는 도달할 수 없었다(그림 3.4.1(a)). 반면, 이중층 그래핀을 갖는 그래핀 메타표면의 경우, $\Delta V = 2.0$ V에서 $\chi = 1$ 인 완전한 원형 편광 상태가 가능함을 실험적으로 보였다(그림 3.4.1(b)). 본 연구에서 $\chi = 1$ 로 완벽한 원형 편광을 실현하는 데 초점을 맞추고 있지만, 이중층 그래핀이 있는 그래핀 메타표면에서 $\Delta\phi \approx 90^\circ$ 및 $\chi \geq 0.98$ 인 편광 상태를 갖는 주파수 범위가 390 GHz 이상임을 확인하였다(그림 3.4.2). 이는 광대역 편광 변조에 적용될 수 있음을 보여준다.

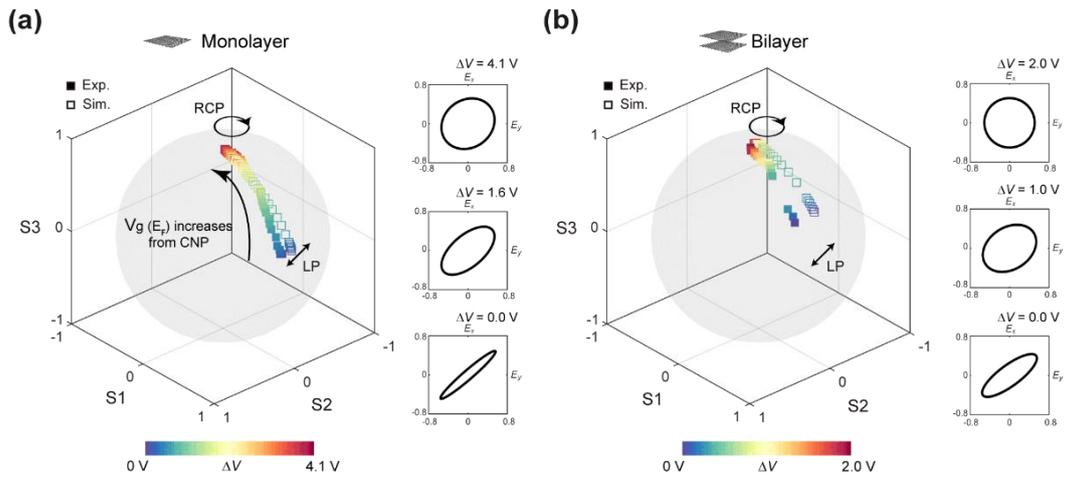


그림 3.4.1 푸앵카레 구에 표현된 편광 상태의 변화. (a) 단층 및 (b) 이중층 그래핀으로 제작된 그래핀 메타표면의 실험적으로 추출된 편광 상태 및 수치적으로 계산된 편광 상태.

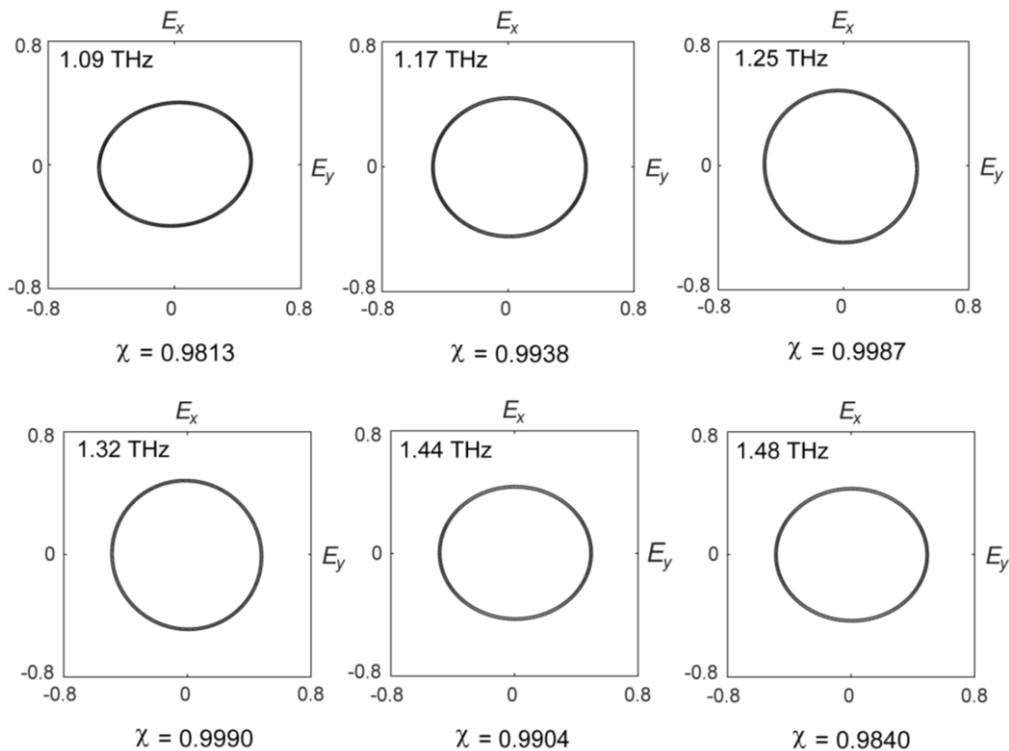


그림 3.4.2 $V_g = -1.2 \text{ V}$ 의 경우 타원율 $\chi \geq 0.98$ 인 편광 상태가 나타나는 주파수.

3.2.1.4 그래핀 메타표면의 추가 설계

앞에서 이중층 그래핀 메타표면에서 달성된 전하 중성점에서의 초기 타원율 값 0.60은 이중층 그래핀의 잔류 전도도가 증가했기 때문이며, 이는 완벽한 선형 편광에서 원형 편광으로 전환이 불가능함을 의미한다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 이중 H형 메타표면은 더 작은 간격 폭으로 설계하고 y축에 그래핀을 추가로 배열하여 간격을 더도록 설계하였다. 이러한 접근법은 강한 용량성 결합으로 인해 더 높은 굴절률을 얻을 수 있으며[15], 잔류 전류에 의한 초기 타원율을 보정할 수 있다. 그림 3.5는 500 nm 간격 폭의 그래핀 메타표면을 통과한 테라헤르츠파의 페르미 준위에 따라 계산된 t_x , t_y (그림 3.5(a)) 및 위상 ϕ_x , ϕ_y (그림 3.5(b, d))를 나타낸다. 계산 결과, 0.70 THz에서 선형 편광(그림 3.5(c))에서 원형 편광(그림 3.5(e))까지 편광 상태를 조절할 수 있음을 알 수 있으며, 능동형 사분 파장판으로 활용될 수 있음을 의미한다.

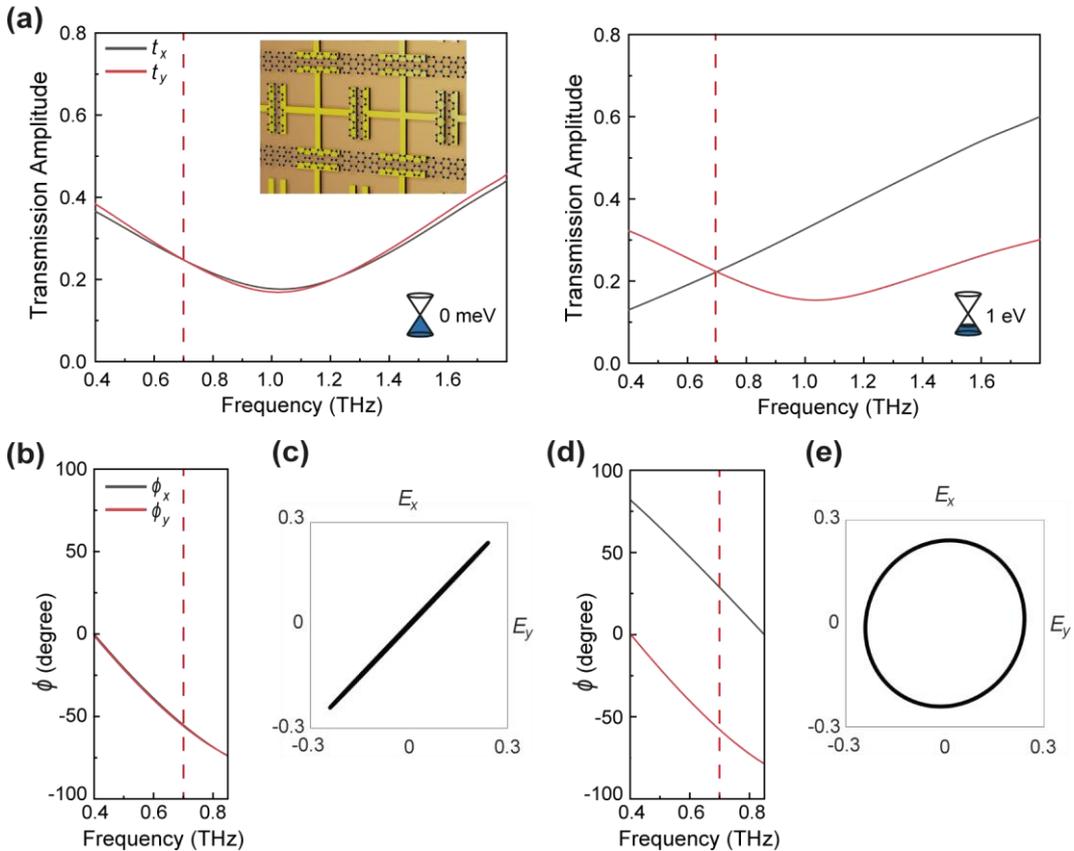


그림 3.5 메타표면 간의 x축 간격에 그래핀이 추가로 결합된 이중층 그래핀 메타표면의 (a) 투과 진폭 및 (b, d) 위상의 수치적 계산 결과. (c, e) 0.70 THz에서의 편광 상태.

3.2.2 빔 분할기

그림 3.6(a, b)는 게이트 전압에 따른 그래핀 및 GMBS를 통해 측정된 투과 및 반사 진폭을 나타낸다. 전하 중성점(검은색 점선) 메타표면 구조가 있는 소자와 없는 소자 모두 거의 동일한 게이트 전압 $V_{\text{CNP}} = 1.7 \text{ V}$ 에 위치함을 볼 수 있다. 전하 중성점을 기준으로 한 게이트 전압차의 크기는 $\Delta V = |V_g - V_{\text{CNP}}|$ 로 정의하였으며, ΔV 가 증가함에 따라 측정된 그래핀의 투과(반사) 진폭은 넓은 주파수 범위에 걸쳐 감소(증가)함을 볼 수 있다. 전하 중성점에서의 잔류 캐리어 농도가 무시되는 경우, 페르미 준위와 게이트 전압은 비례한다($E_F \propto \Delta V^{1/4}$). 이러한 관계를 통해 측정된 테라헤르츠파의 진폭과 페르미 준위의 변화로 계산된 진폭을 직접 비교할 수 있다. 높은 페르미 준위에서 그래핀의 전도도는 더 이상 크게 증가하지 않으며, 수치적 계산에서 고려되지 않았다. 제한된 전도도 제어로 인해 그래핀을 사용한 측정에서는 50:50의 균일한 분할 비율이 관찰되지 않았다. 그러나 GMBS의 경우(그림 3.6(b)), 50:50 분할 비율(파란색 점선)이 비교적 낮은 게이트 전압 $V_g = 0.4 \text{ V}$ 에서 달성될 수 있음을 확인하였다.

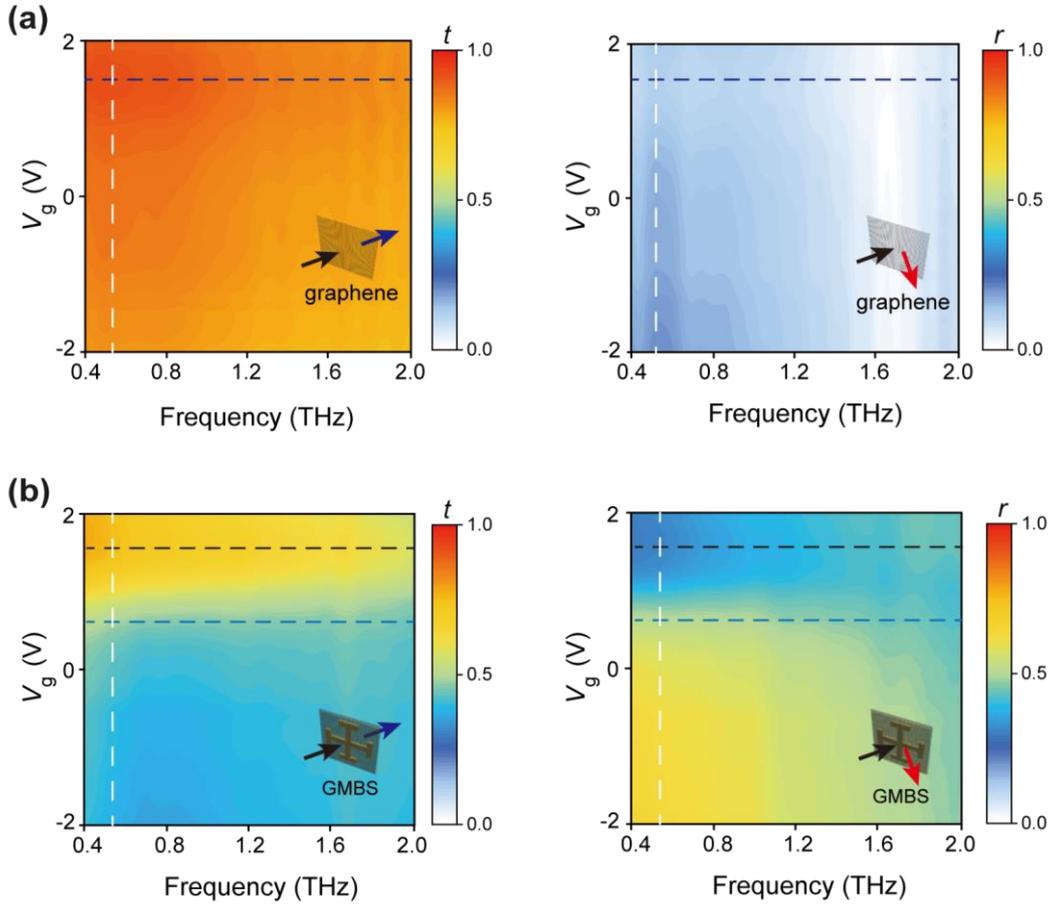


그림 3.6 주파수 및 게이트 전압에 따른 (a) 단일 그래핀 및 (b) 그래핀 메타표면의 실험적으로 측정된 투과 및 반사 진폭.

3.3 그래핀 메타표면 소자의 특성 분석

3.3.1 빔 분할 비

그림 3.7.1은 두 게이트 전압에 대한 그래핀과 GMBS의 투과 및 반사 진폭 비교를 나타낸다. 앞서 2.1.2.1절에서 수치적 계산 결과를 통해 비교하였듯, GMBS에서 $\Delta V = 1.3 \text{ V}$ 인 경우 0.5 THz ~ 2.0 THz의 넓은 주파수 범위에서 50:50의 빔 분할 결과를 얻을 수 있음을 실험적으로 검증하였다(그림 3.7.1 (b)). 이러한 결과는 GMBS가 광대역 빔 분할기로서의 이용 가능성을 의미한다. 게이트 전압에 따른 빔 분할 비를 조사하기 위해, 0.5 THz에서 그래핀 및 GMBS의 투과 및 반사 진폭을 그렸다(그림 3.7.2). 게이트 전압에 따른 빔 분할 가변성은 투과도의 상대

적 변화 $\Delta t/t_{\text{CNP}}$ 에 의해 나타낼 수 있다. 여기서 Δt 는 t 와 t_{CNP} 의 차이를 나타낸다. 게이트 전압에 따른 상대적인 투과 변화는 그래핀의 경우 11%, GMBS의 경우 49%에 달함을 확인하였다. 이는 GMBS이 게이트 전압 범위에 대해 더 넓은 범위의 분할 비율을 수용할 수 있음을 의미한다. 게이트 전압 변화의 최고값인 $\Delta V_{\text{max}} = 3.7$ V의 경우, GMBS의 경우 77:23부터 40:60까지 연속적인 가변 비율이 실험적으로 관찰된다. 반면, 게이트 된 그래핀의 경우 96:4부터 87:13까지의 연속 가변 비율만 관찰된다.

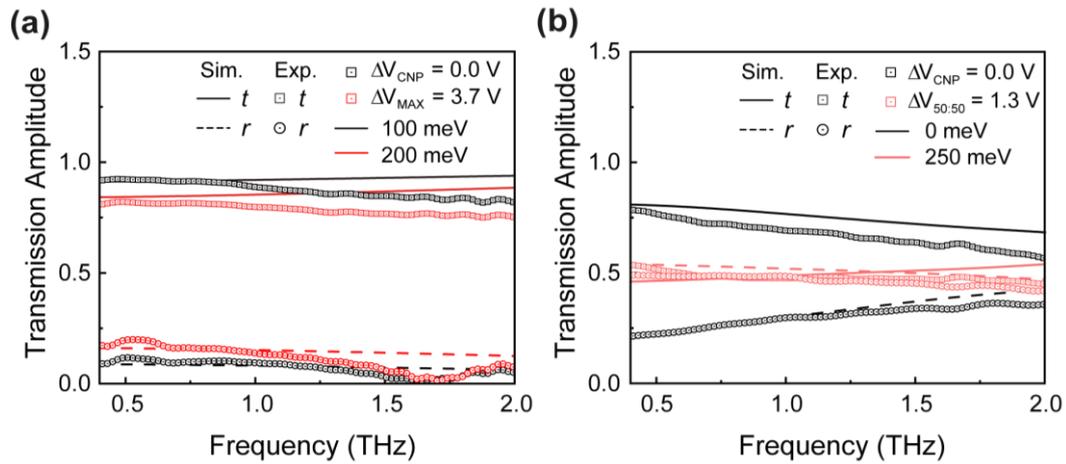


그림 3.7.1 (a) 그래핀 및 (b) GMBS의 대표적인 게이트 전압에 대한 수치적 계산 결과 및 측정 진폭 비교.

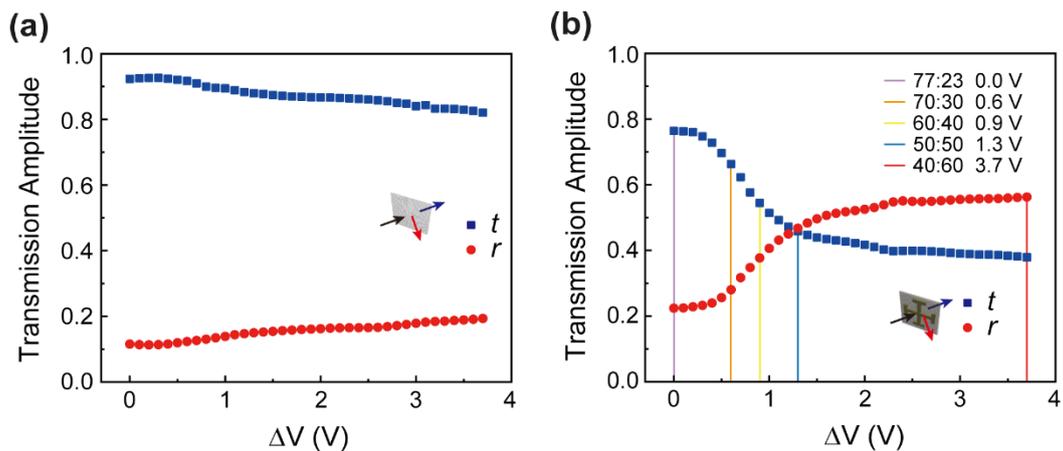


그림 3.7.2 게이트 전압에 따른 0.5 THz에서의 (a) 그래핀 및 (b) GMBS의 투과 및 반사 진폭

3.3.2 빔 분할기의 광대역 특성

그래핀 메타표면 빔 분할기의 특성은 상용 빔 분할기(CBS, TYDEX)와 비교함으로써 추가로 확인할 수 있다. 상용 빔 분할기는 1 mm 두께의 고 저항 실리콘 웨이퍼로 제작되었다. 상용 빔 분할기를 투과하는 테라헤르츠파는 패브리-페로 에탈론 효과에 의해 다중 내부 반사를 겪는다. 이로 인해 투과 및 반사된 테라헤르츠파형에서 지연된 펄스 복제가 명확하게 나타난다(그림 3.8). 반면, 입사된 테라헤르츠파의 중심 파장에 비해 그래핀 메타표면의 두께는 매우 작기 때문에, 지연된 펄스 복제는 스펙트럼에서 거의 확인할 수 없다.

그림 3.9(a)는 상용 빔 분할기를 약 100 ps의 시간 대역으로 측정된 파형을 푸리에 변환(Fourier transform)을 통해 얻은 투과 및 반사 진폭이다. 상용 빔 분할기는 패브리-페로 공진이 스펙트럼에서 명확하게 나타나는 반면, 그래핀 메타표면의 경우 투과 및 반사 진폭은 안정적인 스펙트럼 파형을 보여준다(그림 3.9(b)). 이 특징은 매우 선명한 스펙트럼 특성을 가진 폭발물 및 분자 진동 감지와 같은 높은 분광 분해능 실험에 특히 유용할 수 있다.

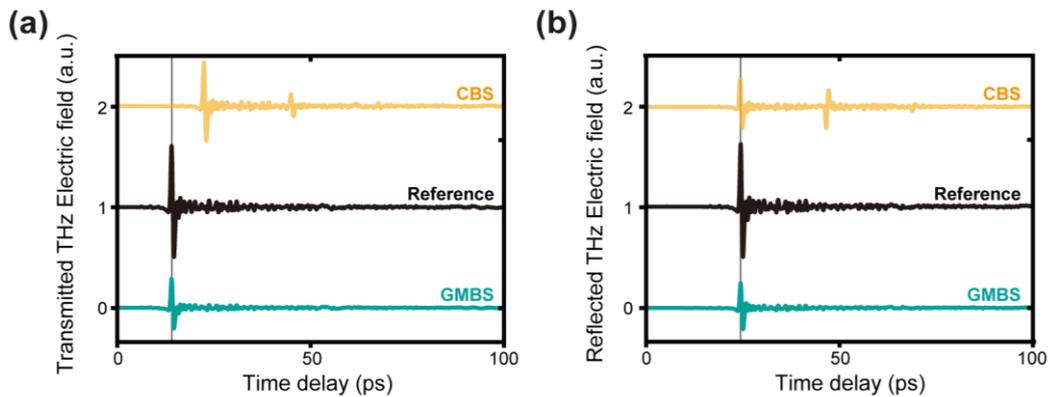


그림 3.8 상용 빔 분할기 및 그래핀 메타표면을 통해 (a) 투과 및 (b) 반사된 테라헤르츠파의 시간 영역 파형.

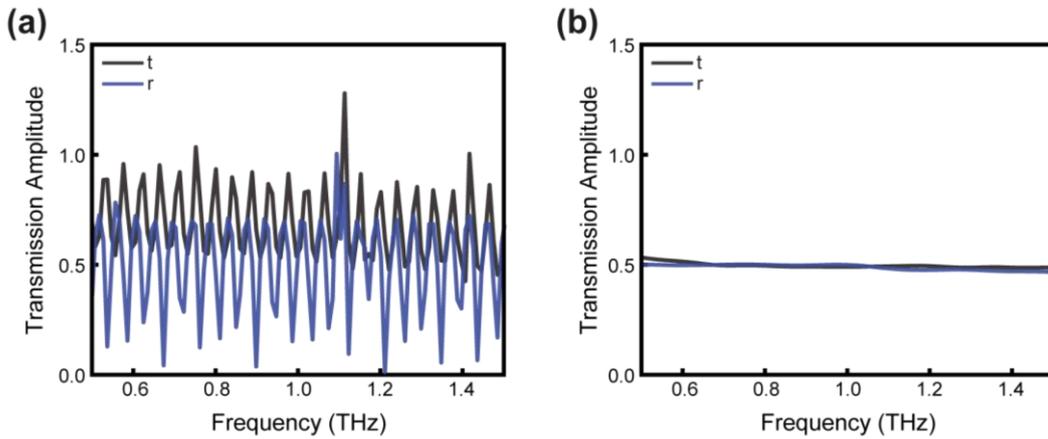


그림 3.9 (a) 패브리-페로 공진을 보여주는 상용 빔 분할기 및 (b) 그래핀 메타표면에 대한 투과 및 반사 진폭.

제 4장 결론

본 연구에서는 테라헤르츠파의 편광 및 빔 분할에 잠재적인 응용을 가진 그래핀 메타표면의 설계, 수치적 계산 결과, 제작 및 실험을 수행하였다. 그래핀의 전도도는 인가되는 게이트 전압에 따라 조절되며 이웃하는 금속 메타표면에 적용될 경우 메타표면의 공진을 약하게 해주어 이방성 및 투과 및 반사 분할 비율을 조절할 수 있음을 보였다. 위상 지연자의 경우, 메타표면의 간격을 줄이고 모든 간격 사이에 그래핀 마이크로 리본을 추가로 결합하면 선형 편광부터 원형 편광까지 전체 범위의 편광 상태 조절이 가능함을 전산 모사를 통해 보였다. 또한, 그래핀과 메타표면을 결합할 경우, 그래핀만으로 얻을 수 없었던 50:50의 분할 비율을 상대적으로 낮은 게이트 전압에서 달성할 수 있음을 확인하였다. 제안된 그래핀 메타표면은 전체 소자 두께는 $11 \mu\text{m}$ 로서 $21/\lambda$ 정도로 얇은 초박형이며, 편광 및 분할 비율을 정밀하게 조절할 수 있어 초소형 테라헤르츠 시스템 및 초정밀 분광 및 센서 개발 등에 응용될 수 있으리라 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] Ferguson B., Zhang XC., Materials for terahertz science and technology, *Nature Mater*, 1, 26-33 (2002).
- [2] E. Pickwell and V. P. Wallace, Biomedical applications of terahertz technology, *J. Phys. D: Appl. Phys*, 39, R301 (2006).
- [3] Ergün S., Sönmez S., Terahertz technology for military applications, *Journal of Management and Information Science*, 3, 13-16 (2015).
- [4] Tadao Nagatsuma, Shogo Horiguchi, Yusuke Minamikata, Yasuyuki Yoshimizu, Shintaro Hisatake, Shigeru Kuwano, Naoto Yoshimoto, Jun Terada, and Hiroyuki Takahashi, Terahertz wireless communications based on photonics technologies, *Opt. Express*, 21, 23736-23747 (2013).
- [5] Daniel M. Mittleman, Twenty years of terahertz imaging, *Opt. Express*, 26, 9417-9431 (2018).
- [6] H. -J. Song and T. Nagatsuma, Present and Future of Terahertz Communications, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 1, 256-263 (2011).
- [7] Koch M., Mittleman D.M., Ornik J. et al., Terahertz time-domain spectroscopy, *Nat Rev Methods Primers*, 3, 48 (2023).
- [8] Wiesayer K., Jördens C., Recent Advances in Birefringence Studies at THz Frequencies. *J Infrared Milli Terahz Waves* 34, 663-681 (2013).
- [9] He Yang, Henri Jussila, Anton Autere, Hannu-Pekka Komsa, Guojun Ye, Xianhui Chen, Tawfique Hassan, and Zhipei Sun, Optical waveplates based on birefringence of anisotropic two-dimensional layered materials, *ACS Photonics*, 4, 3023-3030 (2017).
- [10] Christopher C. Homes, G. Lawrence Carr, Ricardo P. S. M. Lobo, Joseph D. LaVeigne, and David B. Tanner, Silicon beam splitter for far-infrared and terahertz spectroscopy, *Appl. Opt.*, 46, 7884-7888 (2007).

- [11] Bartholin R., *Experimenta crystalli islandici disdiaclastici quibus mira & insolita refractio detegitur*, 60 (1983).
- [12] Gorachand Ghosh, Dispersion-equation coefficients for the refractive index and birefringence of calcite and quartz crystals, *Optics communications*, 163, 95-102 (1999).
- [13] Oleksandr Sushko, Kastriot Shala, Rostyslav Dubrovka, and Robert Donnan, Revised metrology for enhanced accuracy in complex optical constant determination by THz-time-domain spectrometry, *J. Opt. Soc. Am. A*, 30, 979-986 (2013).
- [14] T. J. Yen et al., Terahertz Magnetic Response from Artificial Materials, *Science*, 303, 1494-1496 (2004).
- [15] Choi M., Lee S., Kim Y. et al., A terahertz metamaterial with unnaturally high refractive index, *Nature*, 470, 369–373 (2011).
- [16] Oh S.S., Hess O., Chiral metamaterials: enhancement and control of optical activity and circular dichroism, *Nano Convergence*, 2, 24 (2015).
- [17] Chen X., Huang L., Mühlenbernd H. et al., Dual-polarity plasmonic metalens for visible light, *Nat Commun*, 3, 1198 (2012).
- [18] Nanfang Yu et al., Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction, *Science*, 334, 333-337 (2011).
- [19] Hu Tao, Nathan I. Landy, Christopher M. Bingham, Xin Zhang, Richard D. Averitt, and Willie J. Padilla, A metamaterial absorber for the terahertz regime: Design, fabrication and characterization, *Opt. Express*, 16, 7181-7188 (2008).
- [20] Xu Y., Xu Q., Zhang X., Feng X., Lu Y., Zhang X., Kang M., Han J., Zhang W., Stereo Metasurfaces for Efficient and Broadband Terahertz Polarization Conversion, *Adv. Funct. Mater.*, 32, 2207269 (2022).
- [21] T. Driscoll et al., Memory Metamaterials, *Science*, 325, 1518-1521 (2009).
- [22] Gu J., Singh R., Liu X. et al., Active control of electromagnetically induced

- transparency analogue in terahertz metamaterials, *Nat Commun*, 3, 1151 (2012).
- [23] Chen HT., Padilla W., Zide J. et al., Active terahertz metamaterial devices, *Nature*, 444, 597–600 (2006).
- [24] Lee S., Baek S., Kim T.-T., Cho H., Lee S., Kang J.-H., Min B., Metamaterials for Enhanced Optical Responses and their Application to Active Control of Terahertz Waves, *Adv. Mater*, 32, 2000250 (2020).
- [25] Tang Bin, Yi Ren, Tunable and switchable multi-functional terahertz metamaterials based on a hybrid vanadium dioxide–graphene integrated configuration, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 24, 8408-8414 (2022).
- [26] Seojoo Lee, Won Tae Kim, Ji-Hun Kang, Bong Joo Kang, Fablian Rotermund, and Q-Han Park, Single-layer metasurfaces as spectrally tunable terahertz half- and quarter-waveplates, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 11, 7655-7660 (2019).
- [27] Yun Sun, Yong Xu, Helin Li, Yongshan Liu, Fan Zhang, Houyi Cheng, Shina Tao, Huacai Wang, Wei Hu, Yanqing Lu, Chao Zhao, Tianxiao Nie, Weisheng Zhao, Qi Guo, and Lianggong Wen, Flexible control of broadband polarization in a spintronic terahertz emitter integrated with liquid crystal and metasurface, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 14, 32646-32656 (2022).
- [28] Liu M., Xu Q., Chen X. et al., Temperature-Controlled Asymmetric Transmission of Electromagnetic Waves, *Sci Rep*, 9, 4097 (2019).
- [29] Lee S., Choi M., Kim TT. et al., Switching terahertz waves with gate-controlled active graphene metamaterials, *Nature Mater*, 11, 936–941 (2012).
- [30] Weien Lai, Norman Born, Lorenz Maximilian Schneider, Arash Rahimi-Iman, Jan C. Balzer, and Martin Koch, Broadband antireflection coating for optimized terahertz beam splitters, *Opt. Mater. Express*, 5, 2812-2819 (2015).
- [31] Cong L., Srivastava Y.K., Zhang H. et al., All-optical active THz metasurfaces for ultrafast polarization switching and dynamic beam splitting, *Light Sci Appl*, 7, 28 (2018).
- [32] Castro Neto A. H., Guinea F., Peres N. M. R., Novoselov K. S., and Geim A. K.,

The electronic properties of graphene, *Rev. Mod. Phys.*, 81, 109-162 (2009).

- [33] Wallace P. R., The band theory of graphite, *Phys. Rev.*, 71, 622-634 (1947).
- [34] Schedin F., Geim A., Morozov S. et al., Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene, *Nature Mater*, 6, 652–655 (2007).
- [35] Oostinga J., Heersche H., Liu X. et al., Gate-induced insulating state in bilayer graphene devices, *Nature Mater*, 7, 151–157 (2008).
- [36] Federico Valmorra, Giacomo Scalari, Curdin Maissen, Wangyang Fu, Christian Schönenberger, Jong Won Choi, Hyung Gyu Park, Mattias Beck, and Jérôme Faist, Low-bias active control of terahertz waves by coupling large-area CVD graphene to a terahertz metamaterial, *Nano Lett.*, 13, 3193-3198 (2013).
- [37] Weilu Gao, Jie Shu, Kimberly Reichel, Daniel V. Nickel, Xiaowei He, Gang Shi, Robert Vajtai, Pulickel M. Ajayan, Junichiro Kono, Daniel M. Mittleman, and Qianfan Xu, High-contrast terahertz wave modulation by gated graphene enhanced by extraordinary transmission through ring apertures, *Nano Lett.*, 14, 1242-1248 (2014).
- [38] Miao Ziqi et al., Widely tunable terahertz phase modulation with gate-controlled graphene metasurfaces, *Phys. Rev. X*, 5, 041027 (2015).
- [39] Liu P., Luxmoore I., Mikhailov S. et al., Highly tunable hybrid metamaterials employing split-ring resonators strongly coupled to graphene surface plasmons, *Nat Commun*, 6, 8969 (2015).
- [40] Hyunseung Jung, Hyunwoo Jo, Wonwoo Lee, Moon Sung Kang, and Hojin Lee, Reconfigurable molecularization of terahertz meta-atoms, *ACS Photonics*, 9, 1814-1820 (2022).
- [41] Li Quan et al, Monolayer graphene sensing enabled by the strong Fano-resonant metasurface, *Nanoscale*, 8, 17278-17284 (2016).
- [42] Sreekanth K. V., Ouyang Q., Sreejith S., Zeng S., Lishu W., Ilker E., Dong W., ElKabbash M., Ting Y., Lim C. T., Hinczewski M., Strangi G., Yong K.-T., Simpson R. E., Singh R., Phase-Change-Material-Based Low-Loss Visible-

Frequency Hyperbolic Metamaterials for Ultrasensitive Label-Free Biosensing, *Advanced Optical Materials*, 7, 1900081 (2019).

- [43] Shaoxian Li, Priyo S. Nugraha, Xiaoqiang Su, Xieyu Chen, Quanlong Yang, Márta Unferdorben, Ferenc Kovács, Sándor Kunsági-Máté, Meng Liu, Xueqian Zhang, Chunmei Ouyang, Yanfeng Li, József A. Fülöp, Jianguang Han, and Weili Zhang, Terahertz electric field modulated mode coupling in graphene-metal hybrid metamaterials, *Opt. Express*, 27, 2317-2326 (2019).
- [44] Teun-Teun Kim et al., Electrical access to critical coupling of circularly polarized waves in graphene chiral metamaterials, *Sci. Adv*, 3, e1701377 (2017).
- [45] Xiaolong You, Christophe Fumeaux, Withawat Withayachumnankul, Tutorial on broadband transmissive metasurfaces for wavefront and polarization control of terahertz waves, *J. Appl. Phys.*, 131, 061101 (2022).
- [46] Degl'Innocenti R., Lin H., and Navarro-Cía M., Recent progress in terahertz metamaterial modulators, *Nanophotonics*, 11, 1485-1514 (2022).
- [47] Ziegler Klaus, Minimal conductivity of graphene: Nonuniversal values from the Kubo formula, *Phys. Rev. B*, 75, 233407 (2007).
- [48] V Nam Do and P Dollfus, Modeling of metal-graphene coupling and its influence on transport properties in graphene at the charge neutrality point, *J. Phys.: Condens. Matter*, 22, 425301 (2010).
- [49] M. A. Ordal, L. L. Long, R. J. Bell, S. E. Bell, R. R. Bell, R. W. Alexander, and C. A. Ward, Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared, *Appl. Opt.*, 22, 1099-1119 (1983).
- [50] Mohsin M., Neumaier D., Schall D. et al., Experimental verification of electro-refractive phase modulation in graphene, *Sci Rep*, 5, 10967 (2015).
- [51] Y.-W. Tan, Y. Zhang, K. Bolotin, Y. Zhao, S. Adam, E. H. Hwang, S. Das Sarma, H. L. Stormer, and P. Kim, Measurement of scattering rate and minimum conductivity in graphene, *Phys. Rev. Lett.*, 99, 246803 (2007).
- [52] Novoselov K., Geim A., Morozov S. et al., Two-dimensional gas of massless

Dirac fermions in graphene, *Nature*, 438, 197–200 (2005).

- [53] Lee K.H., Kang M.S., Zhang S., Gu Y., Lodge T.P., and Frisbie C.D., “Cut and Stick” Rubbery Ion Gels as High Capacitance Gate Dielectrics, *Adv. Mater.*, 24, 4457-4462 (2012).
- [54] Kang Junmo et al., Graphene transfer: key for applications, *Nanoscale*, 4, 5527-5537 (2012).
- [55] Kim Beom Joon et al., High-performance flexible graphene field effect transistors with ion gel gate dielectrics, *Nano Lett.*, 10, 3464-3466 (2010).
- [56] Chen JH., Jang C., Adam S. et al., Charged-impurity scattering in graphene, *Nature Phys*, 4, 377–381 (2008).
- [57] Peter Bøggild et al, Mapping the electrical properties of large-area graphene, *2D Mater*, 4, 042003 (2017).
- [58] Quellmalz A., Wang X., Sawallich S. et al., Large-area integration of two-dimensional materials and their heterostructures by wafer bonding, *Nat Commun*, 12, 917 (2021).
- [59] Goldstein Dennis H., *Polarized light*, CRC press, 2017.

English summary

Active Modulation of Optical Properties of Terahertz Wave using Graphene Metasurfaces

Sodam Jeong

Department of Physics, University of Ulsan 44610, Korea

Active control of optical properties of terahertz wave is an important role in various fields such as next-generation wireless communication, medical equipment, and spectroscopy. Specifically, the active manipulation of terahertz wave transmission and reflection amplitudes, along with polarization, is anticipated to substantially enhance the scope of applications for terahertz waves. In this paper, we explore a methodology for the electrical control of terahertz wave optical properties by integrating metasurfaces—a two-dimensional artificial structure—and graphene, a two-dimensional material.

First, we designed a phase retarder that can effectively control the polarization properties of light. Along with the fabrication of an isotropic metallic metasurface with strong capacitive coupling, we patterned graphene into one direction in the electrode gap and electrically controlled its optical conductivity to adjust the refractive index. The metasurface incorporating bilayer graphene demonstrated the conversion of incident linear polarization into circular polarization with a 90-degree relative phase delay, indicating its applicability as a quarter-wave plate.

Secondly, we implemented an active beam splitter that can effectively

adjust the transmittance and reflectance of the incident light. Typically, terahertz beam splitting is achieved based on the impedance determined by the doping level of a silicon wafer. However, beam splitting is limited to some extent due to waveform duplication and distortion from the Fabry–Pérot effect within the relatively thick beam splitter substrate. To address this issue, we used a polymer as a substrate and applied a metasurface that resonates at a frequency higher than the operating frequency. Additionally, graphene was integrated, and the optical conductivity of graphene was adjusted via gate voltage to measure the transmitted and reflected amplitudes. As a result, efficient splitting of incident light without dispersion over a wide operating frequency range from 0.5 to 1.5 THz was demonstrated, along with effective control of the splitting ratio ranging from 50:50 to as extreme as 40:60 or 77:23. The proposed method for actively manipulating terahertz waves using graphene metasurfaces is expected to significantly enhance the performance of terahertz components and enable their miniaturization.