

A Graphene-electrode-based Infrared Fresnel Lens with Multifocal Function

Guk Hyun Nam and Jong-Kwon Lee[†]

Division of Energy and Optical Technology Convergence, Cheongju University, Cheongju 28503, Korea

(Received December 16, 2021; Revised January 3, 2022; Accepted January 10, 2022)

We study through computational simulation the focal performance of an infrared (IR) Fresnel lens, composed of a multilayer-graphene zone plate formed under a graphene electrode. Here the Fermi level E_F of the patterned multilayer graphene is adjusted by the overlying graphene electrode. The Fresnel lens effect, with respect to the reflectance contrast between the graphene electrode and the 8-layer graphene zone plate placed on a glass substrate, has been analyzed over a broad wavelength range from 4 to 30 μm . As the optimal wavelength of 8 μm (considering the reflectance and the reflectance-contrast ratio) is incident upon the Fresnel lens with a focal length of 240 μm , the focal intensity is enhanced by a factor of 4.3 as the E_F of multilayer graphene increases from 0.4 eV to 1.6 eV, and is improved by a factor of 5.8 as the number of graphene layers increases from two to eight. As a result, an all-graphene-based IR Fresnel zone-plate lens, exhibiting multifocal function (240 μm and 360 μm) according to the selected E_F , is proposed as an ultrathin lens platform.

Keywords: Fresnel zone plate, Graphene, Infrared range, Multifocal function

OCIS codes: (050.1965) Diffractive lenses; (130.1750) Components; (160.4670) Optical materials; (220.3630) Lenses

다초점 기능을 갖는 그래핀 전극 기반 적외선 프레넬 렌즈

남국현 · 이종권[†]

청주대학교 에너지·광기술융합학부 광기술에너지융합 전공

☎ 28503 충청북도 청주시 청원구 대성로 298

(2021년 12월 16일 받음, 2022년 1월 3일 수정본 받음, 2022년 1월 10일 게재 확정)

그래핀 전극 아래에 놓인 다층 그래핀 존 플레이트로 구성된 적외선 프레넬 렌즈의 초점 성능을 전산모사를 통해 조사한다. 여기서 패턴된 다층 그래핀의 페르미 에너지 준위(E_F)는 그 위에 놓인 그래핀 전극에 의해 조절된다. 4 μm 에서 30 μm 까지의 광대역 파장에서 유리 기판 위에 놓인 8층 그래핀 존 플레이트와 그래핀 전극의 반사도 대비비에 따른 프레넬 렌즈 효과를 분석하였다. 반사도와 반사도 대비비를 고려한 최적 파장인 8 μm 입사파가 초점거리 240 μm 인 프레넬 렌즈에 입사 시, 다층 그래핀의 E_F 가 0.4 eV에서 1.6 eV로 증가함에 따라 초점 세기가 4.3배, 그래핀 층수가 2층에서 8층으로 증가함에 따라 5.8배 강화되었다. 이를 통해 인가된 E_F 에 따라서 다중 초점(240 μm 및 360 μm) 성능을 보이는 그래핀만으로 구성된 IR 프레넬 렌즈 구조를 초박형 렌즈 플랫폼으로 제안한다.

Keywords: 프레넬 존 플레이트, 그래핀, 적외선 대역, 다초점 기능

OCIS codes: (050.1965) Diffractive lenses; (130.1750) Components; (160.4670) Optical materials; (220.3630) Lenses

I. 서 론

곡면 렌즈들로 구성된 기존의 광학계로 영상을 구현할 때

비구면 모양이나 다중 렌즈 설계와 같은 복잡한 최적화 기술을 이용하여 수차를 개선하고 있으나 여전히 영상 왜곡의 이슈를 지니고 있다. 아울러 적외선 파장 대역의 영상을 얻기 위

[†]Corresponding author: jkleee7@cju.ac.kr, ORCID: 0000-0003-2874-6106

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



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

한 광학 시스템은 많은 공간과 높은 비용이 필요하다. 최근에는 사물인터넷 및 빅데이터 기술에 필요한 대용량의 신호 처리 및 영상을 획득하기 위한 이동용 기기의 수요가 급증하고 있으며, 이러한 기기에 적용되어 다양한 영상을 얻는 광학 시스템은 무게와 부피가 매우 작으면서도 고화질일 것이 요구된다. 따라서 이러한 요구 사항들을 만족하기 위해서 초점 거리에 비해 두께를 무시할 수 있는 초박형 렌즈들을 회절 광학 소자^[1,2]나 메타 표면 구조^[3,4] 등을 이용하여 개발하고 있다. 특히 원점이 일치하는 구대칭 분포를 갖는 볼투명 및 투명한 일련의 환들로 구성된 프레넬 존 플레이트(Fresnel zone plate, FZP)는 영상 왜곡과 관련한 이슈를 피할 수 있을 뿐만 아니라, 초박형이면서도 높은 개구수를 갖는 렌즈를 구현할 수 있다^[1,5]. 따라서 초박형 나노 리소그래피^[6], 근거리 광학현미경^[7], 광 연결^[8], 집적 광학^[9] 분야 등에 적용이 가능한 고효율 FZP 렌즈들이 활발히 개발되고 있다.

그래핀의 고유한 에너지 밴드 구조는 가시광 영역에서 높은 광학적 투과도와 높은 캐리어 이동도 등의 우수한 특성을 나타낼 뿐만 아니라, 그래핀의 전하 캐리어를 전기적 게이팅 또는 화학적 도핑을 통해 용이하게 변경할 수 있다^[10,11]. 따라서 FZP를 그래핀으로 형성 후 전기적인 전압을 인가함으로써 프레넬 렌즈의 초점을 조절하는 연구가 보고되고 있다^[1,12-14]. 관련하여 가시광 및 근적외선 영역에서 그래핀의 페르미 에너지(Fermi energy, E_F) 준위를 변경하여 파장에 따라 FZP 렌즈의 초점을 조절하거나^[12] 플라즈몬 그래핀 나노리본 구조와 FZP 아키텍처를 결합하여 파장 선택적이고 초점 조절이 가능한 프레넬 렌즈를 구현한 결과가 보고되었다^[13]. 하지만 이러한 연구에서는 그래핀의 E_F 조절을 위해 전압을 인가하는 전극 구조에 대한 구체적인 언급이 포함되어 있지 않다. 한편 그래핀의 Dirac 지점에서 전기적인 캐리어 농도 조절을 통해 프린지 필드를 유도하여 가시광선 파장에 관계없이 단일 지점에 초점을 형성하는 그래핀 기반의 정사각형 서브 픽셀 렌즈가 보고되었다^[14]. 이 경우 FZP를 구성하고 있는 그래핀의 E_F 를 변경하기 위해서 그래핀 패턴을 외부 금속 전극에 연결하여 전기적 신호를 인가하게 되는데, 이 경우 렌즈 외곽부의 면적이 증가하게 된다. 또한 FZP 공간의 일부에 전기적 신호를 인가하는 패턴을 형성하는 경우는^[15] 유효 렌즈 공간이 감소하게 되어 FZP 렌즈의 성능이 저하되는 이슈가 남게 된다.

본 논문에서는 제작 공정상의 어려움이나 렌즈 성능의 저하 없이 그래핀 전극 아래에 놓인 다층 그래핀 기반 FZP 렌즈가 중적외선과 원적외선을 포함하는 광대역에서 다중 초점 성능을 보임을 전산모사를 통해 조사하였다. 여기서 패턴된 다층 그래핀 기반 프레넬 렌즈는 위에 놓인 그래핀 전극에 의해 E_F 가 변화한다. 적외선 대역에서 그래핀은 에너지 밴드 내 전자 전이에 의해 흡수 및 투과/반사 특성이 변화하므로, 그래핀의 E_F 나 층수에 따라 입사된 적외선의 반사도와 투과도를 용이하

게 조절할 수 있다. 따라서 그래핀 전극을 통해 인가된 전위에 따른 FZP의 반사율 변화를 적외선 대역에서 분석하였으며, 그래핀 층수에 따라 초점 세기 변화를 살펴보았다. 또한 서로 다른 초점을 갖는 FZP를 쌓아 놓은 구조에서 인가된 E_F 에 따른 초점 거리 변화도 분석하였다.

II. 이론 및 전산모사

2.1. 그래핀의 적외선 대역 전도도

그래핀으로 형성된 적외선 FZP 렌즈를 구현하기 위해서는 그래핀의 적외선 대역의 전도도 특성을 살펴볼 필요가 있다. 그래핀의 표면 전도도(σ)는 아래의 수식으로 표현할 수 있다^[16].

$$\sigma(\omega, \Gamma, E_F, T) = \sigma_{\text{intra}}(\omega, \Gamma, E_F, T) + \sigma_{\text{inter}}(\omega, \Gamma, E_F, T) \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{intra}}(\omega, \Gamma, E_F, T) = \frac{-ie^2}{\pi\hbar^2(\omega+i2\Gamma)} \int_0^\infty \xi \left(\frac{\partial f_d(\xi)}{\partial \xi} - \frac{\partial f_d(-\xi)}{\partial \xi} \right) d\xi \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{inter}}(\omega, \Gamma, E_F, T) = \frac{ie^2(\omega+i2\Gamma)}{\pi\hbar^2} \int_0^\infty \frac{f_d(-\xi)-f_d(\xi)}{(\omega+i2\Gamma)^2-4(\xi/\hbar)^2} d\xi \quad (3)$$

$$f_d(\xi) = (\exp((\xi - E_F)/(k_B T)) + 1)^{-1} \quad (4)$$

여기서 ω 는 각주파수, Γ 는 산란율, E_F 는 페르미 에너지, T 는 온도를 나타낸다. 식 (1)의 오른쪽 첫째 항은 식 (2)로 표현되며 대역내(intraband) 전자-광자 산란에 의한 기여도를 나타내고, 식 (1)의 오른쪽 두번째 항은 식 (3)으로 표현되며 대역간(interband) 전자 전이의 기여도를 나타낸다. 중적외선 및 원적외선 파장에 해당하는 낮은 에너지를 갖는 광자들에 의한 그래핀의 광 흡수는 대역내 전이가 주된 요인인 반면, 근적외선에서 자외선 파장을 갖는 높은 에너지를 갖는 광자에 의한 그래핀의 광 흡수는 대역간 전이에 의해 발생된다. 여기서 대역간 전이의 경우는 E_F 와 관련된 전하 밀도가 증가함에 따라 대역간 Pauli 차단으로 인해 대역간 광전도도가 감소하게 된다^[17]. 한편 중적외선 및 원적외선 영역의 광이 입사되는 경우 인가된 전압에 의한 그래핀의 E_F 변화는 그래핀내 전하 밀도의 변화를 유도하게 되며, 대역내 광전도도는 Drude가 증치($D = (v_F e^2 / \hbar) \sqrt{\pi n}$)^[10,18]에 비례하여 변화하게 된다^[17]. 따라서 중적외선 및 원적외선 대역의 광자에 의한 그래핀의 전도도(흡수)는 E_F 를 전기적으로 제어하여 용이하게 변화시킬 수 있다.

2.2. 그래핀 기반 FZP 렌즈 전산모사

FZP 기반 렌즈의 경우 렌즈의 초점 거리는 연속으로 놓인

동심 환의 가장자리 반경과 관련이 있다. 일반적인 FZP는 투명 영역과 불투명 영역이 번갈아 가며 구성되며, n 번째 영역의 반경(r_n)은 해당 초점(f)과 입사광의 파장(λ)에 따라 아래의 식 (5)로 정해진다.

$$r_n^2 = n\lambda \left(f + \frac{n\lambda}{4} \right) \quad (5)$$

위 식 (5)의 관계에 따라 각각의 FZP의 간격과 너비가 정해지며, n 의 개수에 따라 FZP 렌즈의 직경이 정해진다. 한편 다층 그래핀이 유리 기판에 놓인 경우, 공기/다층 그래핀/유리 기판에 의한 반사도와 공기/유리 기판의 반사도의 대비비가 매우 높으므로^[19], 유리 기판 위에 다층 그래핀을 FZP로 형성한 반사형 프레넬 렌즈를 구현할 수 있다. 그림 1(a)는 유리 기판 위에 형성된 다층 그래핀 FZP와 그 위에 전사된 그래핀 전극으로 구성된 적외선 FZP 렌즈의 개략도를 나타내고 있다. 여기서 8층 그래핀은 기존의 FZP의 불투명 영역에 놓이며, 단일층 그래핀 전극은 FZP의 투명 영역에 놓이는 구조가 된다. 다층 그래핀이 놓인 영역의 층수와 인가된 E_F 에 따라서 다층 그래핀의 반사도가 변화한다. 제안된 프레넬 렌즈를 구현하기 위한 공정흐름도는 그림 1(b)에 표시하였다. 먼저 유리 기판 위에 전사된 다층 그래핀(7층)을 광식각(photolithography) 공정으로 FZP 형태의 패턴을 형성한 후, 단일층 그래핀을 전면에 전사함으로써 FZP의 홀수 번째 환에는 다층 그래핀(8층)이 놓이고, 짝수 번째 환에는 단일층 그래핀이 놓이게 된다. 여기서 패턴된 다층 그래핀의 E_F 는 그래핀 전극을 통해 용이하게 전압을 인가하여 조절할 수 있다. 단일층 그래핀에 0 eV의 E_F 를 인가 시 다층 그래핀 영역이 있는 불투명 영역의 반사도가 낮아지며, 0 eV 이외의 E_F 를 인가 시 FZP의 다층 그래핀 주변에서 회절되어 반사된 빛은 보강 간섭에 의해 초점을 형성하게 된다.

전극으로 사용되는 단일층 그래핀의 반사도와 다층 그래핀이 놓인 영역의 반사도 대비비에 따른 반사형 FZP 렌즈의 초

점 집속 성능을 정량화하기 위해서 finite-difference time-domain 방법^[20]을 사용하여 광학 전산모사를 진행하였다. FZP가 원형 대칭 형태이므로 $f_1 = 240 \mu\text{m}$ 및 $f_2 = 360 \mu\text{m}$ 로 설정된 초점거리에 대해 환의 개수(n)를 50으로 하여 2D 전산모사를 수행하였다. $f_1 = 240 \mu\text{m}$ 인 경우 FZP 렌즈의 직경은 1.19 mm이고 환들의 폭은 $4.3 \mu\text{m}$ - $88.0 \mu\text{m}$ 이며, $f_2 = 360 \mu\text{m}$ 인 경우 FZP 렌즈의 직경은 1.33 mm이고 환의 폭은 $4.6 \mu\text{m}$ - $107.6 \mu\text{m}$ 로, 일반적인 광식각 공정으로 용이하게 패턴을 형성할 수 있다. 여기서 환의 수를 증가시키면 초점 집속 세기가 증가되는데, 제작 공정을 고려하여 환의 수를 적절히 선택하여 사용할 수 있다. 한편 경계조건은 시뮬레이션 영역의 x , y 방향을 따라 완벽하게 일치하는 층(perfectly matched layer)으로 설정하였고, 그래핀 렌즈를 x 방향으로 놓고 평면파를 $-y$ 방향으로 입사시켰다. 평면파 광원이 그래핀 기반 FZP 렌즈에 의해 반사된 전기장의 세기 분포를 다층 그래핀의 수(2, 4, 6, 8층)와 E_F (0, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 eV)에 따라 관찰하였다. 여기서 그래핀의 산란율은 300 K의 온도에서 0.001 eV로 설정하였고, 유리 기판의 파장에 따른 유전율(굴절율) 값들은 Palik^[21]의 데이터를 이용하였다.

III. 결과 및 논의

3.1. 그래핀의 반사 스펙트럼

반사형 FZP 렌즈의 성능은 다층 그래핀의 반사도와 그래핀 전극의 반사도의 대비비에 영향을 받는다. 따라서 그래핀 전극을 통해 E_F 가 변화할 때 나타나는 다층 그래핀과 그래핀 전극의 반사도 스펙트럼을 $4 \mu\text{m}$ - $30 \mu\text{m}$ 파장영역에서 살펴보았다. 그림 2(a)는 E_F 가 0 eV 인가될 때 8층 그래핀과 그래핀 전극의 반사도 스펙트럼을 보여주고 있는데, 반사도의 차이는 매우 적으며 반사도 스펙트럼은 유리 기판의 반사도 특성을 그대로 따르게 된다. 한편 그림 2(b)에서 보이듯이 1.6 eV의 E_F 를 인가한 경우에는 8층 그래핀과 그래핀 전극과의 반사도

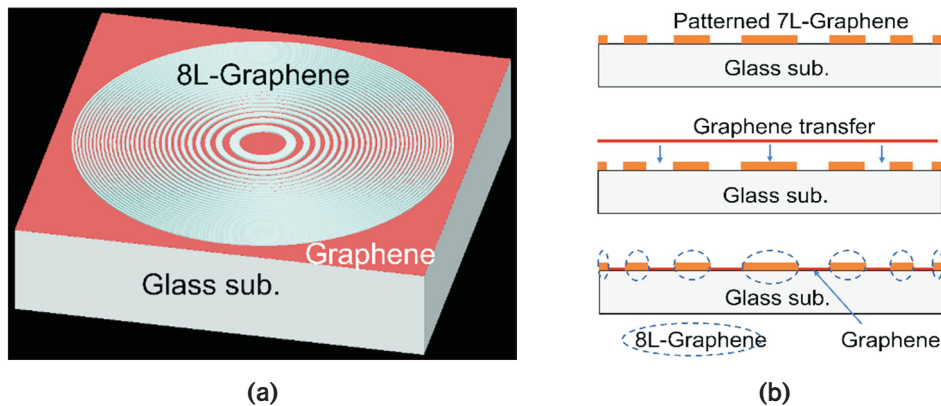


Fig. 1. A graphene-electrode-based infrared Fresnel zone plate (IR FZP) lens. (a) Schematic. (b) Process flow.

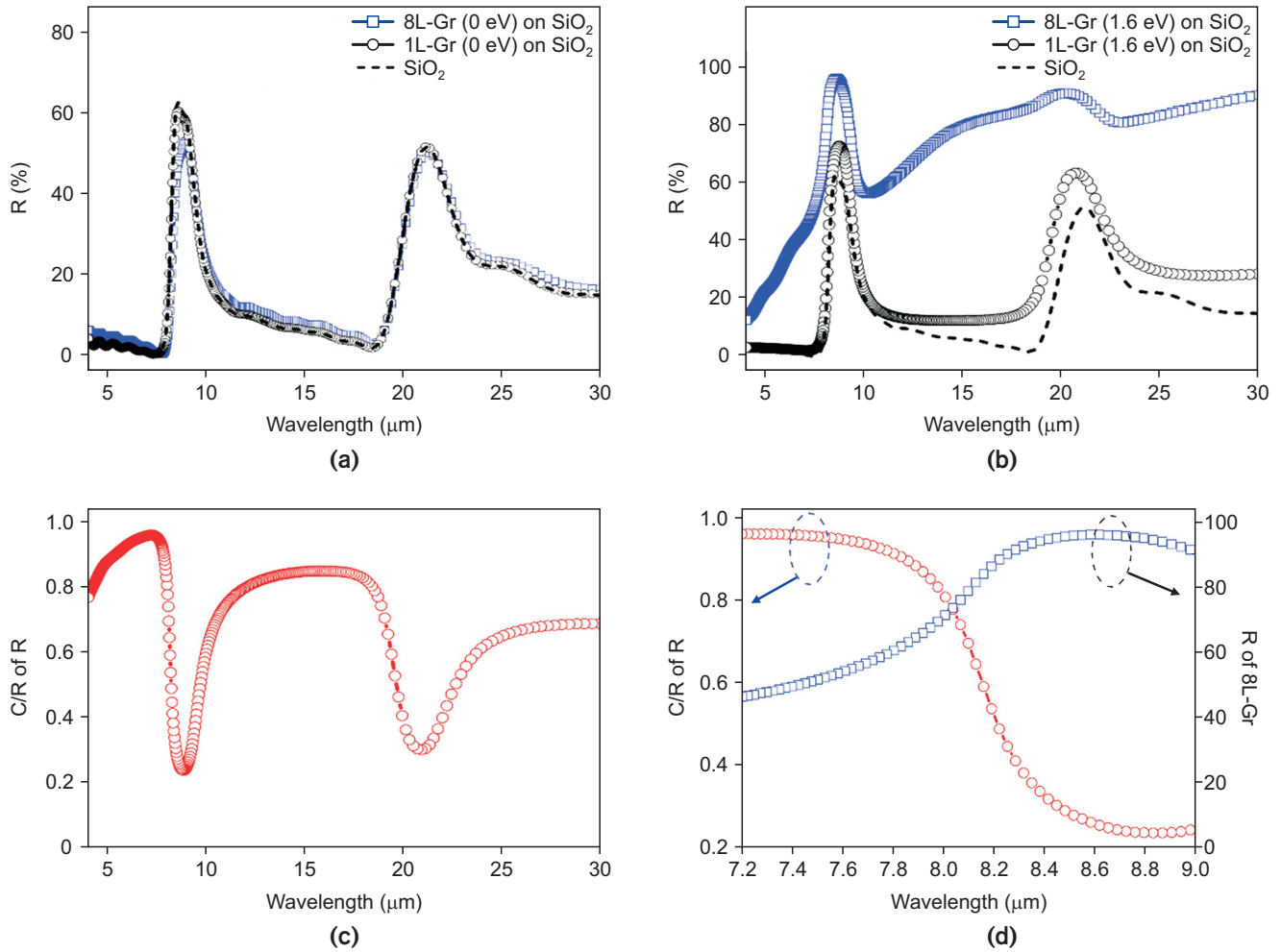


Fig. 2. (a, b) Reflectance spectra of the 8L-graphene and the graphene electrode with (a) $E_F = 0$ eV and (b) $E_F = 1.6$ eV placed on a glass substrate. (c) Reflectance contrast of the 8L-graphene to the graphene electrode. (d) Variation of reflectance and reflectance contrast in a wavelength range of 7.2 μm to 9.0 μm .

차이가 대폭 증가하게 된다. 이것은 그림 2(c)에 표시된 반사도 대비비 스펙트럼을 통해서 7.22 μm 파장에서 최고의 대비비를 보이며 8.83 μm 파장 부근에서 최소 대비비를 보임을 통해 확인할 수 있다. 또한 그림 2(d)와 같이 7.2 μm -9.0 μm 파장 영역에서 유리 기판 위에 놓인 8층 그래핀의 반사도와 대비비 변화 추이를 살펴보면, 파장이 증가함에 따라 반사도가 증가하다가 8.6 μm 부근에서 점차 감소되기 시작하는 반면에 대비비는 파장에 따라 감소하는 경향을 보이므로 상호 trade-off 관계가 있다고 볼 수 있다. 이 두 곡선이 만나는 지점인 8 μm 부근을 해당영역에서 최적파장으로 택해서 FZP 렌즈의 초점 집속 성능을 분석하였다.

3.2. 그래핀의 층수 및 E_F 에 따른 초점의 세기 변화

8 μm 파장의 빛이 FZP 렌즈에 입사된 후 반사되어 나오는 회절 광의 초점 집속 성능은 FZP를 구성하고 있는 다층 그래핀의 층수 및 인가된 E_F 에 영향을 받는다. 먼저 다층 그래핀의

층수를 변화시켜 가면서 초점 집속 성능을 살펴보았다. 그림 3(a)와 그림 3(b)는 4층 그래핀과 8층 그래핀으로 구성된 FZP에 의해 초점거리 240 μm 에서 관찰되는 전기장의 세기 분포를 각각 보여주고 있다. 이러한 FZP의 홀수 번째 환에 놓인 다층 그래핀의 수를 2, 4, 6, 8층으로 증가시키에 따라서 그림 3(c)와 같이 초점 세기가 3.18에서 18.5 [$\text{V}^2 \mu\text{m}^{-2}$]로 선형적으로 증가함을 확인할 수 있다. 한편 8층 그래핀으로 구성된 FZP 렌즈에 인가된 E_F 를 0.4 eV에서 1.6 eV까지 증가시키는 경우 초점의 집속 세기는 그림 3(d)에서와 같이 4.28에서 18.5 [$\text{V}^2 \mu\text{m}^{-2}$]로 증가하되 그 증가는 점차 줄어들고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 그래핀의 수나 그래핀에 인가되는 E_F 에 따라 초점에서의 집속 세기를 용이하게 조절할 수 있음을 보여주며, 이는 그래핀 기반 FZP의 광학 특성(유전율 및 흡수) 변화와 관련되어 있음을 알 수 있다. 즉, 다층 그래핀 영역과 그래핀 전극 영역 사이의 반사도 대비비와 더불어 아래 놓인 기판과 그래핀 층들에 의한 반사도가 렌즈의 집

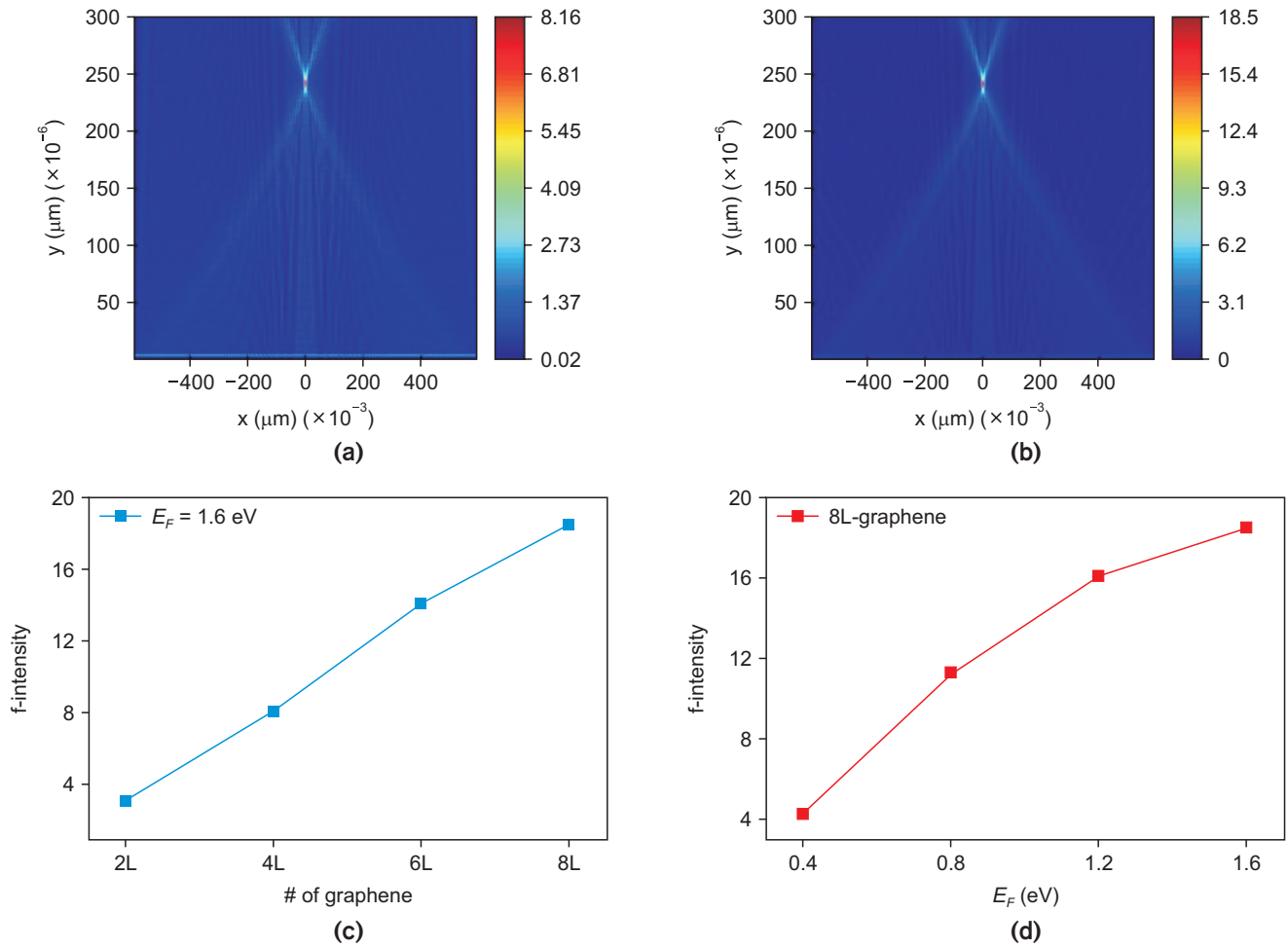


Fig. 3. (a, b) E-field intensity distributions of 8.0 μm light reflected from the Fresnel zone plate (FZP) lens composed of (a) 4L-graphene and (b) 8L-graphene covered by the graphene electrode with $E_F = 1.6$ eV. (c, d) Intensity variation at the focal point according to (c) the layer number and (d) Fermi energy of the patterned multilayer graphene illuminated by 8.0 μm light.

속 성능에 영향을 주는 것을 확인할 수 있다.

3.3. 그래핀만으로 구성된 다중 초점 반사형 프레넬 렌즈

그래핀만으로 구성된 FZP가 렌즈로서 역할을 하므로, 이러한 FZP를 공간적으로 쌓아 올린 구조에 E_F 를 위치별로 다르게 인가하여 초점거리를 변화시킬 수 있다. 그림 4(a)는 초점거리가 240 μm , 360 μm 에 해당하는 서로 다른 FZP를 유리 기판 위에 쌓아 올린 구조를 보여주고 있다. 여기서 서로 다른 두개의 FZP 사이와 구조의 맨 윗층은 두께가 30 nm인 SiO_2 층으로 형성된다. 위에 놓인 FZP는 초점거리 240 μm (f_1)에 해당하며 아래에 놓인 FZP는 초점거리 360 μm (f_2)에 해당한다. 먼저 f_1 과 f_2 에 동시에 $E_F = 0$ eV를 인가할 경우에는 그림 4(b)에 보여지는 전기장의 세기 분포와 같이 초점 형성이 되지 않으며, 관심 영역의 전기장의 세기가 0.25 [$\text{V}^2 \mu\text{m}^{-2}$] 이하로 관찰된다. 반면에 f_1 에 $E_F = 1.6$ eV를 인가하고 f_2 에 $E_F = 0$ eV를 인가한 경우는 그림 4(c)처럼 240 μm 의 위치에서 전기

장의 세기가 15.4 [$\text{V}^2 \mu\text{m}^{-2}$]인 초점이 정확히 형성되었으며, f_1 에 $E_F = 0$ eV를 f_2 에 $E_F = 1.6$ eV를 인가한 경우는 그림 4(d)처럼 360 μm 지점에 전기장의 세기가 17.3 [$\text{V}^2 \mu\text{m}^{-2}$]인 초점이 형성됨을 알 수 있다. 여기서 초점거리에 따라 FZP의 크기가 다르므로 반경이 큰 360 μm 초점에 해당하는 FZP 렌즈의 세기가 240 μm 초점에 해당하는 FZP 렌즈의 세기보다 높게 관찰된다. 그리고 f_1 과 f_2 에 동시에 $E_F = 1.6$ eV를 인가한 경우에는 그림 4(e)에서와 같이 이중 초점이 형성되며, 각 초점에서의 세기의 합은 그림 4(c)와 그림 4(d)의 초점 세기의 평균 값으로 나타남을 알 수 있다. 따라서 원하는 수만큼 그래핀만으로 구성된 FZP를 쌓아 올림으로써 다중 초점을 갖는 초박형 FZP 렌즈를 구현할 수 있다.

본 연구에서는 그래핀 기반 FZP 렌즈의 초점 성능을 분석하기 위해 초점거리를 240 μm , 360 μm 로 선택하여 근거리 영상이나 광 연결, 집적 광학 등의 응용성을 보였지만, 식 (5)의 관계에 의해 입사 파장(λ)에 대한 FZP 렌즈의 직경과 초점 거

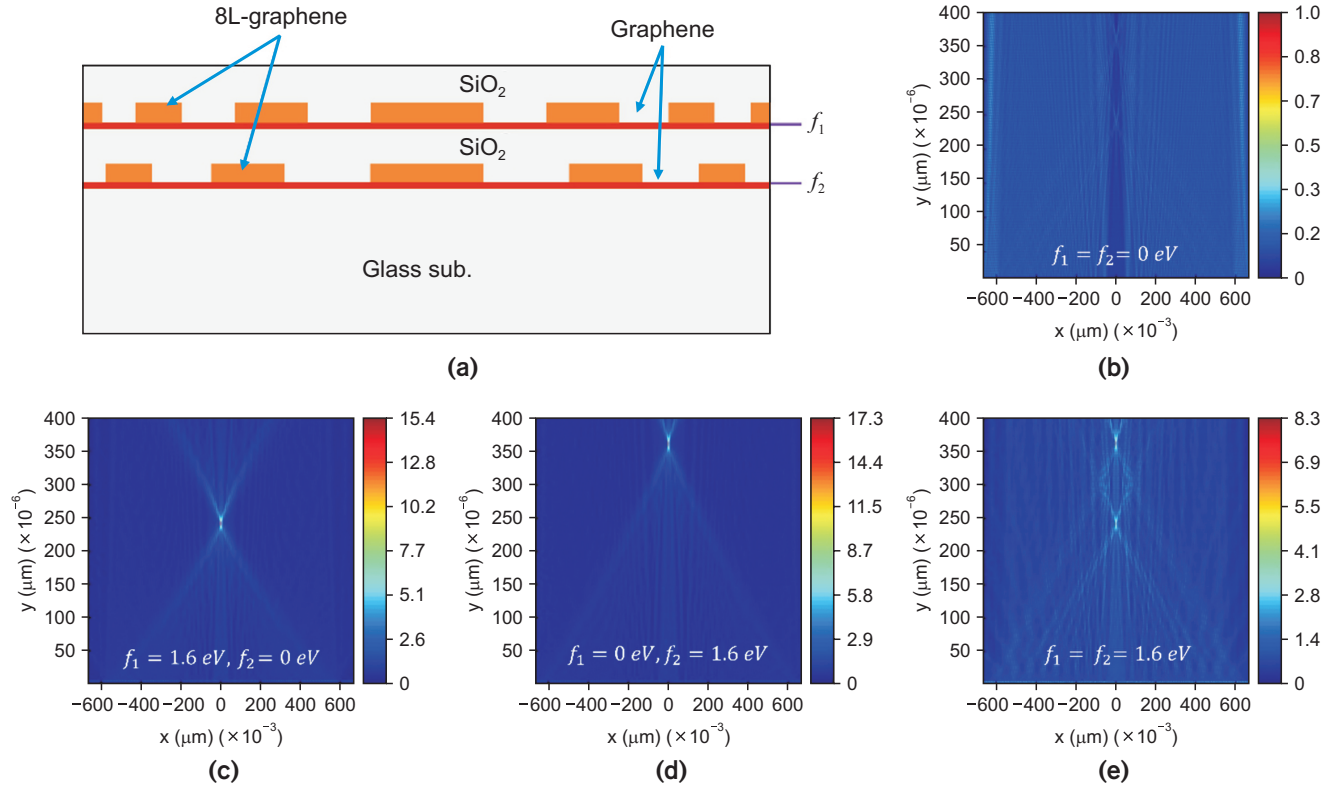


Fig. 4. A graphene-based infrared Fresnel zone plate (IR FZP) lens with multifocal function. (a) Schematic of the IR FZP lens consisting of stacked multilayer-graphene zone plates. (b–e) E-field intensity distributions of 8.0 μm light reflected from the IR FZP lens with the Fermi energies of (b) $f_1 = f_2 = 0 \text{ eV}$, (c) $f_1 = 1.6 \text{ eV}$ & $f_2 = 0 \text{ eV}$, (d) $f_1 = 0 \text{ eV}$ & $f_2 = 1.6 \text{ eV}$, and (e) $f_1 = f_2 = 1.6 \text{ eV}$.

리를 수 mm-수십 mm 영역까지 확장할 수 있다. 이 경우 렌즈의 초점 거리(f) 증가에 따른 초점에서 빔의 크기가 증가되는 이슈가 있게 되는데, 회절 제한 광학렌즈의 개구수(NA)에 해당하는 환의 개수(n)와 초점에서 빔의 크기(ω)에 대한 $n = \lambda f / 4\omega^2$ 관계로부터 환의 개수를 증가시켜 해당 초점크기를 일정하게 유지할 수 있다.

IV. 결론

다층 그래핀으로 형성된 FZP에 그래핀을 단순히 전사함으로써 제작이 용이하면서도 외부 전극이 필요하지 않은 다중 초점 기능을 갖는 FZP 렌즈 구조에 대한 연구를 전산모사를 통해 진행하였다. 반사도와 반사도 대비비 측면에서 최적의 파장인 8 μm 의 입사파에 대해서, 다층 그래핀의 수를 2, 4, 6, 8층으로 증가시킬 시 $E_F = 1.6 \text{ eV}$ 인가 조건에서 초점 세기가 3.18에서 18.5 [$\text{V}^2 \mu\text{m}^{-2}$]로 선형적으로 증가하며, 8층 그래핀으로 구성된 FZP 렌즈에 인가된 E_F 를 0.4 eV에서 1.6 eV로 증가 시 초점 세기는 4.28에서 18.5 [$\text{V}^2 \mu\text{m}^{-2}$]로 증가하게 된다. 또한 공간적으로 쌓아 올린 서로 다른 초점 거리(240 μm , 360 μm)를 갖는 FZP들로 구성된 프레넬 렌즈가 각 층에 인가된 E_F 에 따라 초점 거리가 조절될 뿐만 아니라 다중 초점 구

현이 가능함을 보였다. 제안된 적층형 FZP 렌즈 구조는 그래핀의 E_F 인가 여부에 따라 렌즈 모드 또는 투과/반사 모드로 동작하는 기능을 갖춘 초박형 렌즈 플랫폼으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은(2020-2021)학년도에 청주대학교 산업과학연구소가 지원한 학술연구조성비(특별연구과제)에 의해 연구되었음.

References

1. X. T. Kong, A. A. Khan, P. R. Kidambi, S. Deng, A. K. Yetisen, B. Dlubak, P. Hiralal, Y. Montelongo, J. Bowen, S. Xavier, K. Jiang, G. A. J. Amaratunga, S. Hofmann, T. D. Wilkinson, Q. Dai, and H. Butt, "Graphene-based ultrathin flat lenses," *ACS Photonics* **2**, 200-207 (2015).
2. M. Meema, S. Banerjia, A. Majumdera, F. G. Vasquez, B. Sensale-Rodriguez, and R. Menona, "Broadband lightweight flat lenses for long-wave infrared imaging," *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **116**, 21375-21378 (2019).
3. F. Aieta, P. Genevet, M. A. Kats, N. Yu, R. Blanchard, Z. Gaburro, and F. Capasso, "Aberration-free ultra-thin flat lenses

- and axicons at telecom wavelengths based on plasmonic meta-surfaces,” *Nano Lett.* **12**, 4932-4936 (2012).
4. F. Xia, H. Wang, D. Xiao, M. Dubey, and A. Ramasubramaniam, “Two-dimensional material nanophotonics,” *Nat. Photonics* **8**, 899-907 (2014).
5. Y. Zhang, H. An, D. Zhang, G. Cui, and X. Ruan, “Diffraction theory of high numerical aperture subwavelength circular binary phase Fresnel zone plate,” *Opt. Express* **22**, 27425-27436 (2014).
6. E. T. F. Rogers, J. Lindberg, T. Roy, S. Savo, J. E. Chad, M. R. Dennis, and N. I. Zheludev, “A super-oscillatory lens optical microscope for subwavelength imaging,” *Nat. Mater.* **11**, 432-435 (2012).
7. Y. Fu, W. Zhou, and L. E. N. Lim, “Near-field behavior of zone-plate-like plasmonic nanostructures,” *J. Opt. Soc. Am. A* **25**, 238-249 (2008).
8. M. Ferstl and A.-M. Frisch, “Static and dynamic Fresnel zone lenses for optical interconnections,” *J. Mod. Opt.* **43**, 1451-1462 (1996).
9. K. Kodate, E. Tokunaga, Y. Tatuno, J. Chen, and T. Kamiya, “Efficient zone plate array accessor for optoelectronic integrated circuits: design and fabrication,” *Appl. Opt.* **29**, 5115-5119 (1990).
10. A. H. C. Neto, F. Guinea, N. M. R. Peres, K. S. Novoselov, and A. K. Geim, “The electronic properties of graphene,” *Rev. Mod. Phys.* **81**, 109-162 (2009).
11. F. Wang, Y. Zhang, C. Tian, C. Girit, A. Zettl, M. Crommie, and Y. R. Shen, “Gate-variable optical transitions in graphene,” *Science* **320**, 206-209 (2008).
12. S. Deng, A. K. Yetisen, K. Jiang, and H. Butt, “Computational modelling of a graphene Fresnel lens on different substrates,” *RSC Adv.* **4**, 30050-30058 (2014).
13. S. Deng, H. Butt, K. Jiang, B. Dlubak, P. R. Kidambi, P. Seneor, S. Xavier, and A. K. Yetisene, “Graphene nanoribbon based plasmonic Fresnel zone plate lenses,” *RSC Adv.* **7**, 16594-16601 (2017).
14. S. Park, G. Lee, B. Park, Y. Seo, C. B. Park, Y. T. Chun, C. Joo, J. Rho, J. M. Kim, J. Hone, and S. C. Jun, “Electrically focus-tuneable ultrathin lens for high-resolution square subpixels,” *Light Sci. Appl.* **9**, 98 (2020).
15. C. Damgaard-Carstensen, M. Thomaschewski, F. Ding, and S. I. Bozhevolnyi, “Electrical tuning of Fresnel lens in reflection,” *ACS Photonics* **8**, 1576-1581 (2021).
16. G. W. Hanson, “Dyadic Green’s functions and guided surface waves for a surface conductivity,” *J. Appl. Phys.* **103**, 064302 (2008).
17. K. F. Mak, L. Ju, F. Wang, and T. F. Heinz, “Optical spectroscopy of graphene: from the far infrared to the ultraviolet,” *Solid State Commun.* **152**, 1341-1349 (2012).
18. N. M. R. Peres, “The transport properties of graphene: an introduction,” *Rev. Mod. Phys.* **82**, 2673-2700 (2010).
19. H. S. Skulason, P. E. Gaskell, and T. Szkopek, “Optical reflection and transmission properties of exfoliated graphite from a graphene monolayer to several hundred graphene layers,” *Nanotechnology* **21**, 295709 (2010).
20. Ansys-Lumerical, “FDTD solutions,” <https://www.lumerical.com/products/fdtd/> (Accessed date: December 10, 2021).
21. E. D. Palik, *Handbook of Optical Constants of Solids* (Academic Press, USA, 1985), Volume 2.