

Comparison of Sensing Ability of Extraordinary Optical Transmission Sensor for Diverse Configurations of Substrate Hole Array

Yeji Lee¹, Hyerin Song¹, Heesang Ahn¹, and Kyujung Kim^{1,2†}

¹Department of Cogno-Mechatronics Engineering, Pusan National University,
2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea

²Department of Optics and Mechatronics Engineering, Pusan National University,
2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea

(Received December 3, 2018; Revised January 4, 2019; Accepted January 31, 2019)

In this paper, we investigated the sensing ability of an extraordinary optical transmission sensor, which is based on the diverse configurations of highly ordered structures. The diverse nanostructures of subwavelength hole array were designed to have different periods and lattice configurations of the array. To verify the sensing ability of the sensor, we measured the transmittance spectra of samples ($n = 1.333, 1.363$) for diverse configurations of substrates. The measured transmittance spectra of diverse materials with different refractive indices show that the sensitivity increased as the period of the structures increased. Also, improved sensing performance of the sensor was achieved for the square array, compared to the hexagonal array.

Keywords: Subwavelength hole array, Extraordinary optical transmission, Square array, Hexagonal array

OCIS codes: (250.5403) Plasmonics; (280.4788) Optical sensing and sensors; (310.6628) Subwavelength structures, nanostructures

다양한 홀 어레이 기판에서 측정된 특이 광 투과 센서의 센싱 성능 비교

이예지¹ · 송혜린¹ · 안희상¹ · 김규정^{1,2†}

¹부산대학교 인지메카트로닉스공학과

☎ 46241 부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2

²부산대학교 광메카트로닉스공학과

☎ 46241 부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2

(2018년 12월 3일 받음, 2019년 1월 4일 수정본 받음, 2019년 1월 31일 게재 확정)

본 논문에서는 다양한 배열을 가지는 기판에서의 특이 광 투과 센서 시스템의 센싱 성능을 조사하였다. 보조파장 홀 어레이 구조는 어레이의 주기와 격자 배열을 달리하여 제작하였고, 특이 광 투과 센서 시스템으로 제작한 기판에서의 투과 스펙트럼을 측정하였다. 굴절률이 다른 유전물질을 이용하여 투과 스펙트럼을 관찰한 결과 어레이의 주기가 증가할수록 센서의 민감도가 높아짐을 보였다. 또한 육각형 어레이에서 측정된 결과와 비교하였을 때 정사각형 어레이에서 센서의 성능이 향상됨을 입증하였다.

Keywords: 보조파장 개구 어레이, 특이 광 투과, 정사각형 어레이, 육각형 어레이

OCIS codes: (250.5403) Plasmonics; (280.4788) Optical sensing and sensors; (310.6628) Subwavelength structures, nanostructures

I. 서 론

일반적으로 기존의 Bethe 이론에 따라 파장보다 작은 크기를 가지는 홀에서는 빛이 투과하지 못한다고 알려져 있었지만 1998년 Ebbesen 그룹은 빛이 파장 이하의 크기를 갖는 보조파장 홀(subwavelength hole)을 투과할 때 표면 플라즈몬

에 의해 특이적으로 강한 세기의 빛이 투과한다는 사실을 발표했으며 이러한 현상을 특이 광 투과(extraordinary optical transmission, EOT)라고 정의했다^[1,2]. 특이 광 투과 현상이 발표된 이후로, 보조파장 홀 어레이에서의 투과 스펙트럼을 분석하여 근본적인 원인을 찾는 연구와 이미징 시스템, 나노 리소그래피, 센서 등 많은 응용분야로 연구되고 있다^[3-7].

†E-mail: k.kim@pusan.ac.kr, ORCID: 0000-0002-0913-2291

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

표면 플라즈몬(surface plasmons, SPs)은 유전체와 금속의 경계면에서의 집단적인 전자 진동이며, 표면 플라즈몬 폴라리톤(surface plasmon polaritons, SPPs)은 빛과 집단적인 전자파가 금속의 표면에서 강하게 결합한 것이다^{8,9)}. 특히 광 투과 현상은 주로 표면 플라즈몬 폴라리톤의 파장과 홀 어레이의 주기가 일치할 때 발생한다^{10,11)}. 금속 필름에 보조파장 홀 어레이가 있는 경우에는 필름에서 여기된 표면 플라즈몬 폴라리톤의 파장과 어레이의 주기가 일치할 때 강한 전자 진동이 홀 주변에서 여기된다. 홀의 양 측면에 형성된 강한 집단적인 전자 진동은 파장보다 작은 홀에서 큰 투과를 야기시키고 필름의 다른 면으로 전파되어 보조파장 홀 어레이에서 보다 더 큰 세기의 빛이 투과하게 된다¹²⁻¹⁴⁾.

특이 광 투과 현상을 여러 가지 분야에서 응용하기 위해서는 파장보다 작은 크기를 갖는 보조파장 홀 어레이 기판이 필요하다. 특히, 특이 광 투과 현상은 홀의 지름, 모양 그리고 어레이의 주기 등에 영향을 받기 때문에 원하는 조건에 적합한 나노 크기의 보조파장 홀 어레이 기판의 제작이 필수적이다¹⁵⁻¹⁷⁾. 전자빔(e-beam) 리소그래피, 집속 이온빔(focused ion beam, FIB) 리소그래피, 간섭(interference) 리소그래피와 같은 나노 크기의 패턴 제작 기술의 발전은 원하는 나노 크기의 패턴을 갖는 기판의 제작을 가능하게 하였고, 이런 기술들을 기반으로 제작된 다양한 조건을 갖는 홀 어레이 기판에서의 특이 광 투과 현상의 연구가 활발하게 이루어지고 있다¹⁸⁻²⁰⁾. 특히 보조파장 홀 어레이의 격자 배열을 다르게 하였을 때 투과 스펙트럼을 분석하여 센서로 응용하기 더 좋은 구조를 찾아내는 연구가 이루어지고 있다²¹⁻²⁴⁾. 그 중 보편적으로 쓰이고 있는 정사각형 어레이보다 특이한 다른 구조를 가지는 육각형 어레이 구조가 더 높은 민감도를 가지고 있어 센서로 쓰이기엔 더 적합한 구조라는 연구결과가 있다. 나노 홀 배열은 다양한 grating order에 따른 표면 플라즈몬 전파의 여기와 관련된 강한 투과 피크를 보이기 때문에 grating order를 정의하는 정수(m, n)로 표현된 특이 광 투과 신호는 대략 식 (1)과 같은 grating coupling 조건을 따르는 파장에 위치한다.

$$\vec{k}_{SP} = \vec{k}_{inc,l} + m\vec{b}_1 + n\vec{b}_2 \quad (1)$$

\vec{k}_{SP} 는 표면 플라즈몬의 파수벡터이며 $\vec{k}_{inc,l}$ 는 금속 표면에 입사한 광자의 파수 벡터이고, \vec{b}_1 과 \vec{b}_2 는 역격자 벡터이다. 이 역격자 벡터는 격자 배열에 따라 달라지는데, 정사각형 어레이에서는 $|\vec{b}_1| = |\vec{b}_2| = \frac{2\pi}{P}$ 이며 육각형 어레이에서는 $|\vec{b}_1| = |\vec{b}_2| = \frac{4\pi}{\sqrt{3}P}$ 이다. 이때 P는 어레이의 주기를 나타낸다.

$$k_{SP} = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_d \epsilon_m}{\epsilon_d + \epsilon_m}} \quad (2)$$

식 (2)는 표면 플라즈몬의 분산관계(dispersion relation)를 표현하는 식으로 k_0 는 진공에서의 파수이며 ϵ_d 와 ϵ_m 은 유전체와 금속에서의 유전상수이다. 식 (1)과 식 (2)를 사용하면 정사각형 어레이(식 (3))와 육각형 어레이(식 (4))에서 특이 광 투과 현상으로 인한 투과 피크를 구할 수 있다.

$$\lambda_{res} = \frac{P}{\sqrt{m^2 + n^2}} \sqrt{\frac{\epsilon_d \epsilon_m}{\epsilon_d + \epsilon_m}} \quad (3)$$

$$\lambda_{res} = \frac{P}{\sqrt{\frac{4}{3}(m^2 + mn + n^2)}} \sqrt{\frac{\epsilon_d \epsilon_m}{\epsilon_d + \epsilon_m}} \quad (4)$$

정사각형 어레이와 육각형 어레이는 격자 배열이 다르기 때문에 식 (3)과 식 (4)처럼 다르게 표현이 되며, 이에 따라 투과 스펙트럼 피크 파장이 달라지게 된다^{23,24)}. 하지만 이러한 연구는 거의 시뮬레이션 결과로 이루어지고 있어 실제 실험 결과가 필요하다.

본 실험에서는 보조파장 홀 어레이 구조에서 어레이의 격자 배열이 다른 육각형 어레이와 정사각형 어레이에서 투과 스펙트럼을 측정하여 분석하려 한다. 먼저 보조파장 홀 어레이 구조의 투과 스펙트럼을 볼 수 있는 센서 시스템을 구축하였고 홀의 지름은 250 nm로 고정하고 육각형 어레이와 정사각형 어레이에서 주기가 450, 550, 650 nm인 6개의 보조파장 홀 어레이 구조의 패턴을 갖는 기판을 제작하였다. 그 후 제작한 센서 시스템으로 제작한 홀 어레이 패턴에서 투과 스펙트럼을 측정하여 각 기판마다 센싱되는 파장과 민감도 등을 분석하였다. 이를 토대로 육각형 어레이와 정사각형 어레이에서 센서로 이용되기 더 적합한 최적의 구조를 찾으려 한다.

II. 실험

2.1. 특이 광 투과를 이용한 센서 시스템 제작

본 실험에서는 특이 광 투과 현상으로 얻어진 투과 스펙트럼 데이터를 얻기 위해 그림 1과 같이 시스템을 제작하였다. 본 시스템은 보조파장 나노 홀 어레이 패턴을 투과하는 빛의 스펙트럼을 측정하기 위한 것으로 넓은 범위(360~2400 nm)에서 투과 스펙트럼을 측정하기 위해 백색광(HL2000, Ocean Optics, Inc.)을 광원으로 사용하였다. 백색광의 퍼지는 빛은 두 개의 렌즈를 투과하면서 평행화(collimated) 되었고 기판 위의 보조파장 홀 어레이 패턴에 초점을 맞추기 위해 10배율 대물렌즈를 사용하였다. 패턴을 투과한 빛은 20배율 대물렌즈를 통해 다시 평행화되었고 그 후 렌즈를 통해 분광기(USB 4000, Ocean Optics, Inc.)로 투과된 빛을 받아 스펙트럼을 측정하였다.

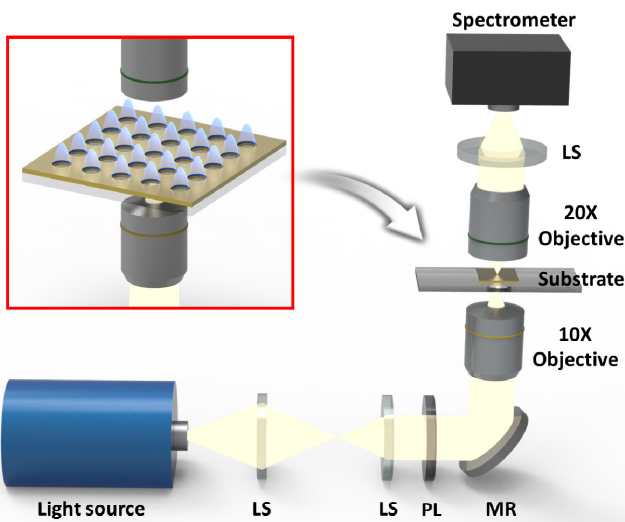


Fig. 1. The schematic image of sensor system using the extraordinary optical transmission phenomenon through the array of subwavelength holes (Light source; White light, LS; Lens, PL; Polarizer, MR; Mirror).

2.2. 보조파장 홀 어레이 패턴 제작

각 조건의 나노 홀 어레이 패턴을 제작하기 위해 그림 2(a)와 같은 전자 빔 리소그래피 방식을 이용하였다. 먼저 BK7 유리 기판에 접착층인 Cr 2 nm와 Au 10 nm를 증착시켰다. 그 후 음각 레지스트(Ma-N-2403, MicroChem, MA, USA)를 코팅하였고 전자 빔 리소그래피를 통해 나노 홀 어레이에 전자 빔을 조사시켜 포스트를 제작하였다. 나노 포스트가 있는 기판에 금 100 nm를 증착시킨 후 lift-off 공정을 통해 음각 레지스트를 제거하여 그림 2(b)의 육각형 어레이와 (c)의 정사각형 어레이를 갖는 나노 홀 어레이 패턴을 제작하였다. 제작한 육각형 어레이와 정사각형 어레이의 전자빔 리소그래피 공정에서 전자빔을 조사하는 과정에서의 시간이 각각 1.5 시간과 0.5 시간이 소모되는데, 이 차이의 이유는 다음과 같다. 첫째, 본 연구에서 사용한 전자빔 리소그래피 공정 장비를 활용하여 넓은 면적의 패턴을 형성하려면 패턴의 사각

형 모양의 단위 패턴을 설정하고, 이 단위 패턴을 일정한 주기로 패턴을 하여야 넓은 면적의 나노 단위의 패턴 어레이를 얻을 수 있다. 육각형 어레이에서 사각형 모양의 단위 패턴을 형성하려면 홀 한 개를 그릴 때 반원 2개를 이용하여 그려야 해서 기존의 정사각형 어레이보다 패턴 형성 시간이 오래 걸리게 된다. 두 번째로, 육각형 어레이가 정사각형 어레이에 비해 fill factor가 높다는 것에서 차이가 난다. Fill factor는 단위 면적당 홀 개수를 확인한 것으로 육각형 어레이가 정사각형 어레이에 비해 단위 면적당 홀의 개수가 1.3배 정도 높은 것을 알 수 있다. 이러한 두 이유로 인해 같은 면적에서 육각형 어레이보다 정사각형 어레이가 제작 시간이 적은 것을 확인하였다.

2.3. 시뮬레이션 실행

보조파장 나노 홀 어레이에서의 투과 스펙트럼 분석 결과를 확인하기 위해 엄밀한 결합과 해석(rigorous coupled-wave analysis, RCWA)방법을 기반으로 시뮬레이션이 수행되었다. 시뮬레이션 결과는 실험을 검증하기 위한 기준으로 사용될 수 있었다. 시뮬레이션은 홀의 지름이 250 nm이고 어레이의 주기가 450 nm인 보조파장 홀 어레이 구조에서 이루어졌다. 보조파장 홀 어레이 구조에서 어레이의 모양을 육각형과 정사각형으로 설정하였으며, 2개의 다른 구조에서 굴절률을 1.333에서 1.363으로 변화시켰을 때의 투과 스펙트럼을 통해 민감도를 계산할 수 있었다.

III. 결과 및 고찰

특이 광 투과 현상을 이용한 센서의 민감도를 향상시킬 수 있는 최적의 구조를 찾기 위해 제작된 센서 시스템을 사용하여 다양한 조건의 패턴에서 투과 스펙트럼을 측정하였다. 홀의 지름은 선행 연구된 논문을 통해 250 nm로 고정하였으며^[16,25], 홀 어레이의 주기와 모양을 변수로 설정하였다. 홀 어레이의 주기는 450 nm, 550 nm, 650 nm로 변화시켰으며, 육각형과 정사각형 어레이에서 각각 스펙트럼 측정이 이루어졌다.

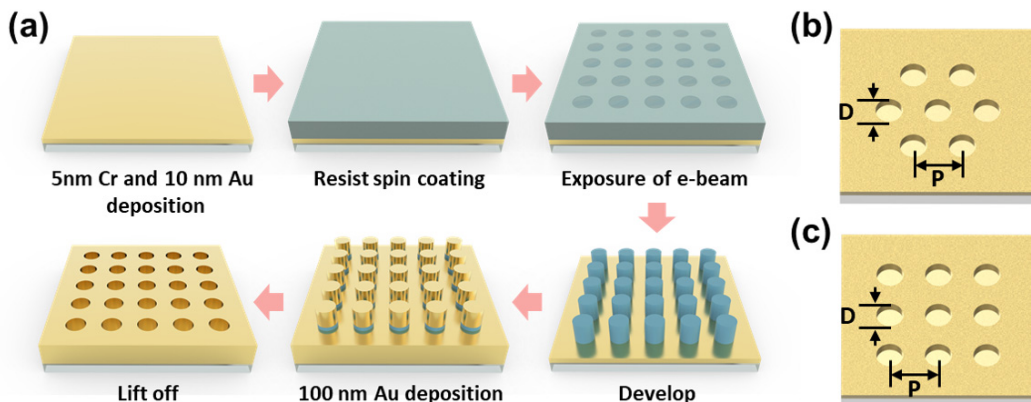


Fig. 2. (a) Fabrication process of the subwavelength hole array. The schematic image of (b) hexagonal and (c) rectangular subwavelength hole array with desired condition; D (diameter of hole): 250 nm, P (period of array): 450 nm, 550 nm, 650 nm.

일반적으로 플라즈모닉 기반의 센서는 굴절률의 변화에 따른 스펙트럼의 이동하는 파장으로 민감도를 측정하기 때문에^[26,27] 굴절률이 다른 증류수($n=1.333$)와 에탄올($n=1.363$)을 사용하여 투과 스펙트럼을 측정하였다. 그림 3은 각각 다른 조건의 6개의 패턴에서 측정된 투과 스펙트럼으로 (a), (b), (c)는 정사각형 어레이에서 순서대로 450 nm, 550 nm, 650 nm의 주기를 갖는 구조에서 측정한 것이고 (d), (e), (f)는 육각형 어레이에서 450 nm, 550 nm, 650 nm의 주기를 갖는 구조에서 측정한 것이다. 검은색 선은 기판 위에 증류수를 떨어뜨렸을 때의 투과 스펙트럼이고 에탄올을 떨어뜨렸을 때의 투과 스펙트럼은 빨간색 선으로 나타냈다. 주기가 450 nm인 정사각형 어레이 구조에 증류수와 에탄올을 떨어뜨렸을 때는 피크 파장이 665.64 nm에서 667.60 nm (그림 3(a))로 이동했으며, 주기가 550 nm일 때는 747.51 nm에서 762.51 nm (그림 3(b)), 그리고 주기가 650 nm일 때는 902.05 nm에서 919.86 nm로 이동하였다(그림 3(c)). 또한 주기가 450 nm인 육각형 어레이 구조에 증류수와 에탄올을 떨어뜨렸을 때는 688.61 nm에서 692.93 nm (그림 3(d)), 주기가 550 nm일 때는 655.86 nm에서 679.68 nm (그림 3(e)), 그

리고 주기가 650 nm일 때는 779.05 nm에서 794.86 nm로 파장이 이동하였다(그림 3(f)). 즉 정사각형 어레이 패턴 위에 떨어뜨린 유전물질의 굴절률이 증가할 때 450 nm, 550 nm, 650 nm의 주기에서는 피크파장이 11.96 nm, 15.01 nm, 17.81 nm만큼 이동하였으며 육각형 어레이에서는 주기가 450 nm, 550 nm, 650 nm일 때 피크파장이 4.32 nm, 13.82 nm, 15.81 nm 이동하였다. 그림 3을 통해 정사각형 어레이의 보조파장 홀 패턴을 갖는 기판에서는 주기가 450 nm에서 550 nm 그리고 650 nm로 증가함에 따라 피크파장이 영역이 600 nm 후반에서 700 nm 중반 그리고 900 nm 초반까지 이동하였음을 볼 수 있었으며, 육각형 어레이의 경우 450 nm와 550 nm의 주기의 패턴에서는 피크파장의 영역이 600 nm 중후반에 있었으며 650 nm의 주기의 패턴에서는 피크파장의 영역이 700 nm 후반에서 측정됨을 알 수 있었다. 이를 통해 각 조건의 패턴마다 센서로 쓰기 좋은 파장 영역을 알 수 있었다. 또한 굴절률이 0.03 증가할 때 이동하는 피크파장의 값을 통해 각 패턴에서의 센싱 가능한 민감도를 계산할 수 있었으며 이를 그림 3의 각 투과 스펙트럼 안에 파란색으로 표시해 두었으며 이를 표 1에 정리하여 나타내었다.

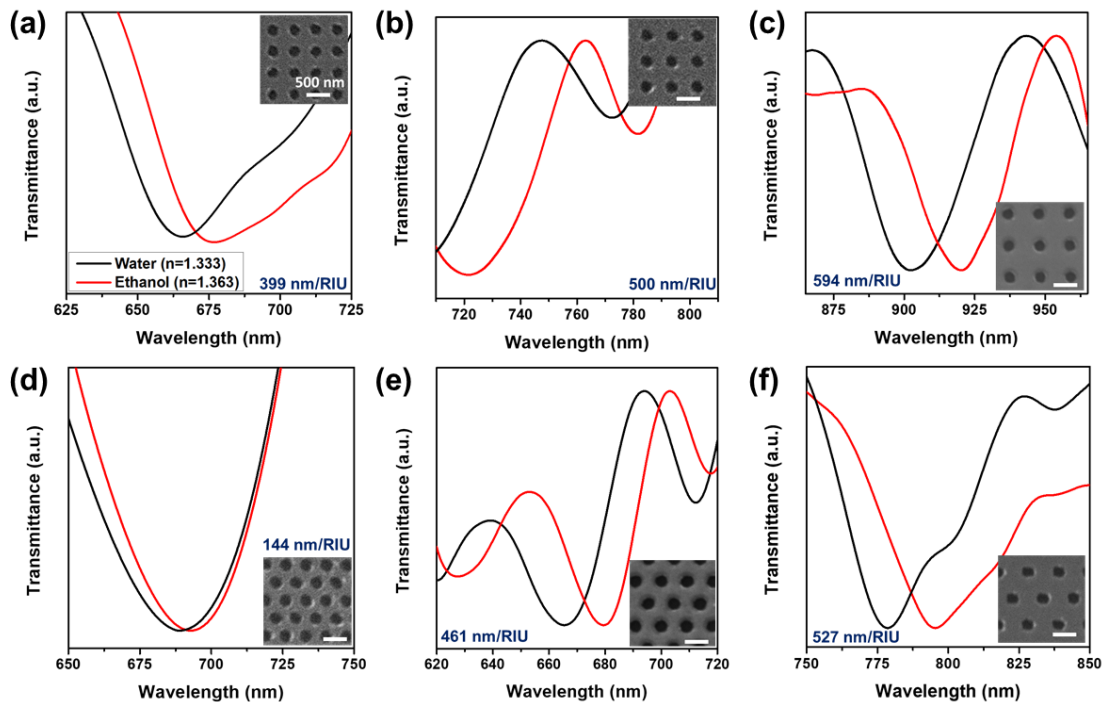


Fig. 3. Transmittance spectra through the subwavelength hole array. (a) Square array of 450 nm period, (b) 550 nm period, (c) 650 nm period. (d) Hexagonal array of 450 nm period, (b) 550 nm period, (c) 650 nm period. The inset is an SEM image of the subwavelength hole array and the scale bar is 500 nm.

Table 1. Sensitivity of diverse nanostructures

Lattice configuration of array	Period of array		
	450 nm	550 nm	650 nm
Square array	399 nm/RIU	500 nm/RIU	594 nm/RIU
Hexagonal array	144 nm/RIU	461 nm/RIU	527 nm/RIU

정사각형 어레이와 육각형 어레이에서 실험결과를 확인하기 위해 각 조건에서 시뮬레이션이 수행되었다. 그림 4는 굴절률이 1.333에서 1.363으로 증가할 때 250 nm의 지름을 가지는 정사각형 어레이에 대해 계산된 투과 스펙트럼이다. 그림 4(a)는 450 nm의 주기에서의 실험 결과이고 그림 4(b)는 주기가 650 nm일 때 계산 결과이다. 또한 그림 4(a)에 삽입된 그림은 700 nm의 파장에서 근접장 분포이다. 그림 4를 보면 주기가 450 nm일 때 투과 스펙트럼은 12 nm 이동하였으며 650 nm일 때는 투과 스펙트럼이 18.5 nm 이동하였다. 이는 즉, 주기가 450 nm일 때는 민감도가 400 nm/RIU의, 650 nm의 주기에서는 민감도가 617 nm/RIU임을 뜻한다. 이 결과는 실제 실험결과인 그림 3(a), 3(c)와 비교하였을 때 아주 유사함을 보이고 있다. 그림 4(a), 4(b)는 그림 3(a), 3(c)와 같은 파장대에서 유사한 형태로 투과 스펙트럼을 보이고 있으며, 민감도 또한 실제 실험에서 측정된 값과 유사한 값을 가짐을 알 수 있었다.

실험을 통해 측정된 6개의 다른 구조에서의 파장 변화를 쉽게 볼 수 있도록 굴절률 증가에 따른 피크 파장의 이동도

를 그림 5(a)에 도식화하였다. 그림 5(a)에서 정사각형 어레이 패턴에서 측정된 굴절률에 따른 파장의 이동도는 빨간색 선으로, 육각형 어레이 패턴에서 굴절률에 따른 파장의 이동도는 파란색 선으로 나타냈고, 450 nm 주기의 패턴에서의 결과는 실선으로 550 nm 주기의 패턴에서의 결과는 파선으로 650 nm의 주기의 패턴에서의 결과는 점선으로 표시하였다. 그림 4는 굴절률에 따른 파장의 이동하는 정도를 나타낸 것이기 때문에 그래프에서 기울기는 각 패턴에서의 민감도라고 볼 수 있다. 먼저 정사각형 어레이의 주기가 450 nm에서 550 nm, 650 nm로 증가함에 따라 기울기 즉 민감도가 399 nm/RIU에서 500 nm/RIU, 594 nm/RIU로 증가하는 것을 알 수 있었고, 육각형 어레이의 주기가 증가함에 따라 민감도가 144 nm/RIU에서 461 nm/RIU, 527 nm/RIU로 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 같은 홀의 직경과 주기를 갖는 패턴에서는 정사각형 어레이가 육각형 어레이보다 더 높은 민감도를 가짐을 볼 수 있었다. 이를 확인하기 위해 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 육각형 어레이와 정사각형 어레이의 투과 스펙트럼을 얻어 민감도를 계산하였고, 이는 그림 5(b)에서 확

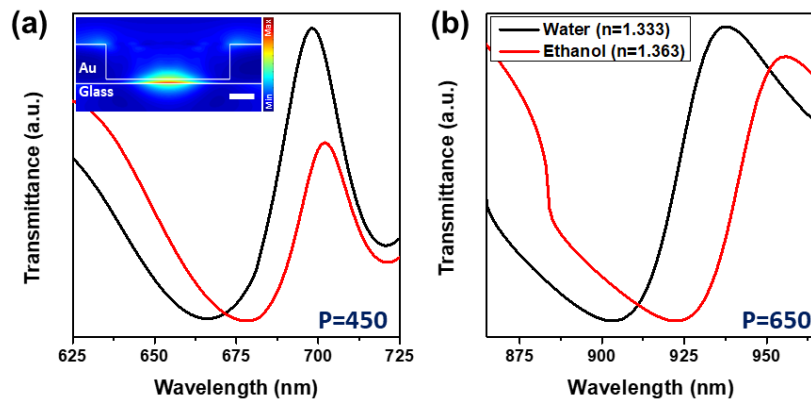


Fig. 4. Calculated transmittance spectra through the nanohole square array with 250 nm-diameter when the refractive index is changed from 1.3 to 1.4. (a) The period is 450 nm. The inset is the near-field distribution through the hole arrays formed by the normally incident 700 nm wavelength light. The scale bar is 50 nm. (b) The period is 650 nm. The black and red curves correspond to water and ethanol, respectively.

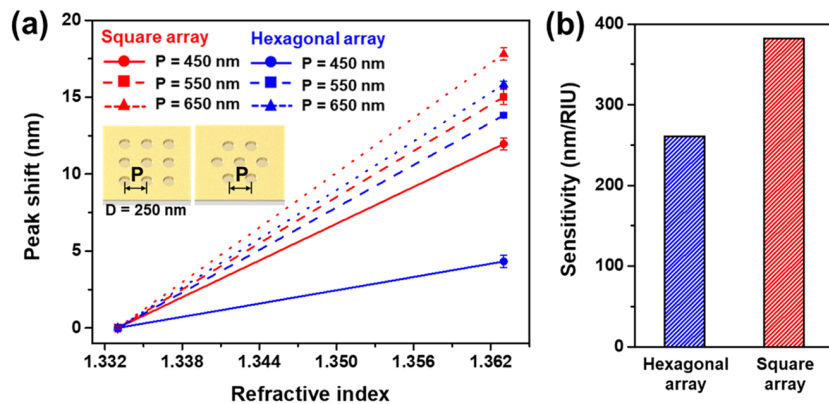


Fig. 5. (a) Peak shifts measured for a change in refractive index (led line; square array, blue line; hexagonal array, solid line; 450 nm period, dashed line; 550 nm period, dot line; 650 nm period). (b) Calculated sensitivity of transmittance spectra through the 250 nm-diameter nanohole array with 450 nm-period.

인할 수 있다. 시뮬레이션은 육각형 어레이와 정사각형 어레이 중 어떤 구조가 더 민감도가 높을지 확인하기 위해 홀의 지름이 250 nm이고 주기가 450 nm인 홀 어레이 구조에서 어레이의 배열만 육각형과 정사각형으로 달리하여 이루어졌다. 그 결과 육각형 어레이에서는 261 nm/RIU의 민감도를, 정사각형 어레이에서는 382 nm/RIU의 민감도를 얻어 육각형 어레이의 구조보다 정사각형 어레이의 구조가 더 민감도가 높음을 확인할 수 있었다. 즉, 민감도의 측면에서 보자면 같은 모양의 어레이 안에서 홀의 지름이 250 nm일 때 어레이의 주기가 450 nm에서 550 nm, 650 nm로 증가할 때 민감도가 높으며, 홀의 지름이 250 nm이고 주기가 450 nm, 550 nm, 650 nm일 때 육각형 어레이보다는 정사각형 어레이일 때 민감도가 향상되어 센서로 쓰기 적합하다는 것을 알 수 있었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 특이 광 투과 현상을 이용한 센서 시스템을 제작하여 센서의 민감도를 향상시킬 수 있는 보조파장 홀 어레이의 조건을 찾았다. 보조파장 홀 어레이 패턴은 어레이의 주기와 격자 배열을 다르게 하여 제작하였으며, 육각형 어레이와 정사각형 어레이 중에 더 좋은 어레이의 격자 배열은 어떤 것인지, 어떤 주기에서 센서의 민감도가 높은지를 투과 스펙트럼을 분석하여 알아보았다. 특이 광 투과 현상을 이용한 센서는 대물렌즈를 사용하여 패턴에 빛의 초점을 맞추고 투과한 빛을 받아 측정하는 방식으로 구축되었으며, 6개의 다른 조건을 가지는 보조파장 홀 어레이 기반은 전자 빔 리소그래피 방식을 통해 제작되었다. 보조파장 홀 어레이 기반에서 스펙트럼 이동을 보기 위해 굴절률이 다른 증류수와 에탄올을 사용하였으며 그 결과 각 조건에서 센서의 민감도를 얻을 수 있었다. 또한 실험을 통해 얻어진 각 패턴의 민감도를 통해 홀의 지름이 250 nm일 때 주기가 증가할수록 민감도가 높아지며 육각형 어레이 구조보다 정사각형 어레이 구조를 사용하였을 때 센서의 민감도가 더 향상됨을 알 수 있었다. 이는 참고한 계산 논문의 결과와는 반대되는 결과로^[23,24], 기관이나 계산상 조건이 실제 실험 조건과 맞지 않아 육각형 어레이보다 정사각형 어레이의 기관에서 민감도가 더 높게 관찰되었다. 이는 앞에서 설명한 식 (3)과 식 (4)을 통해 알 수 있는데, 금속의 종류가 달라지게 되면서 금속의 유전상수가 변하게 되었고, 주기를 다르게 변수로 설정하여 참고한 시뮬레이션 논문과는 다른 결과를 얻을 수 있었다. 실제로 육각형 어레이 구조의 패턴을 제작하는 것보다 정사각형 어레이 구조의 패턴을 제작하는 데에 시간이 절약되므로 육각형 어레이 구조의 패턴보다 정사각형 어레이 구조의 패턴을 센서 시스템에 사용하는 것이 더욱 효율적이다. 따라서 본 논문에서는 민감도 측면에서나 시간적으로나 특이 광 투과 현상을 이용한 센서로 사용되기에 육각형 어레이보다 정사각형 어레이의 구조가 더 적합함을 제시한다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

1. H. A. Bethe, "Theory of diffraction by small holes," *Phys. Rev.* **66**, 163 (1944).
2. T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi, T. Thio, and P. A. Wolff, "Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays," *Nature* **391**, 667-669 (1998).
3. S. H. Chang, S. K. Gray, and G. C. Schatz, "Surface plasmon generation and light transmission by isolated nanoholes and arrays of nanoholes in thin metal films," *Opt. Express* **13**, 3150-3163 (2005).
4. A. Peer and R. Biswas, "Extraordinary optical transmission in nanopatterned ultrathin metal films without holes," *Nanoscale* **8**, 4657-4666 (2016).
5. J. R. Choi, K. Kim, Y. Oh, A. L. Kim, S. Y. Kim, J. S. Shin, and D. Kim, "Extraordinary transmission-based plasmonic nanoarrays for axially super-resolved cell imaging," *Adv. Opt. Mater.* **2**, 48-55 (2014).
6. M. M. Alkai, R. J. Blaikie, S. J. McNab, R. Cheung, and D. R. S. Cumming, "Sub-diffraction-limited patterning using evanescent nearfield optical lithography," *Appl. Phys. Lett.* **75**, 3560-3562 (1999).
7. W. Yue, Z. Wang, Y. Yang, J. Li, Y. Wu, L. Chen, B. Ooi, X. Wang, and X.-X. Zhanget, "Enhanced extraordinary optical transmission (EOT) through arrays of bridged nanohole pairs and their sensing applications," *Nanoscale* **6**, 7917-7923 (2014).
8. E. N. Economou, "Surface plasmons in thin films," *Phys. Rev.* **182**, 539 (1969).
9. H. Ditlbacher, J. R. Krenn, G. Schider, A. Leitner, and F. R. Aussenegg, "Two-dimensional optics with surface plasmon polaritons," *Appl. Phys. Lett.* **81**, 1762-1764 (2002).
10. X. Zhang, G. Liu, Z. Liu, Y. Hu, Z. Cai, X. Liu, and M. Liu, "Near-field plasmon effects in extraordinary optical transmission through periodic triangular hole arrays," *Opt. Eng.* **53**, 107108 (2014).
11. R. Gordon, D. Sinton, K. L. Kavanagh, and A. G. Brolo, "A new generation of sensors based on extraordinary optical transmission," *Acc. Chem. Res.* **41**, 1049-1057 (2008).
12. A. V. Zayats and I. I. Smolyaninov, "Near-field photonics: surface plasmon polaritons and localized surface plasmons," *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **5**, S16 (2003).
13. G. D. Qing, S. Krishnan, P. Z. Li, V. D. Hilmi, H. K. Chan, and W. S. Xiao, "A two-dimensional nanopatterned thin metallic transparent conductor with high transparency from the ultraviolet to the infrared," *Appl. Phys. Lett.* **101**, 181112 (2012).

14. S. A. Darmanyan and A. V. Zayats, "Light tunneling via resonant surface plasmon polariton states and the enhanced transmission of periodically nanostructured metal films: an analytical study," *Phys. Rev. B* **67**, 035424 (2003).
15. Y. Wang, Y. Qin, and Z. Zhang, "Extraordinary optical transmission property of X-shaped plasmonic nanohole arrays," *Plasmonics* **9**, 203-207 (2014).
16. M. Irannejad and B. Cui, "Effects of refractive index variations on the optical transmittance spectral properties of the nano-hole arrays," *Plasmonics* **8**, 1245-1251 (2013).
17. Z. Marcet, Z. H. Hang, C. T. Chan, I. Kravchenko, J. E. Bower, R. A. Cirelli, and H. B. Chan, "Optical transmission through double-layer, laterally shifted metallic subwavelength hole arrays," *Opt. Lett.* **35**, 2124-2126 (2010).
18. X. Zhang, Z. Li, S. Ye, S. Wu, J. Zhang, L. Cui, and B. Yang, "Elevated Ag nanohole arrays for high performance plasmonic sensors based on extraordinary optical transmission," *J. Mater. Chem.* **22**, 8903-8910 (2012).
19. F. Watt, A. A. Bettioli, J. A. Van Kan, E. J. Teo, and M. B. H. Breese, "Ion beam lithography and nanofabrication: a review," *Int. J. Nanosci.* **4**, 269-286 (2005).
20. N. Feth, C. Enkrich, M. Wegener, and S. Linden, "Large-area magnetic metamaterials via compact interference lithography," *Opt. Express* **15**, 501-507 (2007).
21. Q. J. Wang, J. Q. Li, C. P. Huang, C. Zhang, and Y. Y. Zhu, "Enhanced optical transmission through metal films with rotation-symmetrical hole arrays," *Appl. Phys. Lett.* **87**, 091105 (2005).
22. T. Thio, H. F. Ghaemi, H. J. Lezec, P. A. Wolff, and T. W. Ebbesen, "Surface-plasmon-enhanced transmission through hole arrays in Cr films," *J. Opt. Soc. Am. B* **16**, 1743-1748 (1999).
23. Y. Ekşioğlu, A. E. Cetin, and J. Petráček, "Optical response of plasmonic nanohole arrays: comparison of square and hexagonal lattices," *Plasmonics* **11**, 851-856 (2016).
24. A. E. Cetin, M. Dršata, Y. Ekşioğlu, and J. Petráček, "Effect of lattice geometry on optical transmission through subwavelength nanohole arrays," in *Proc. 10th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (METAMATERIALS)* (Greece, Sept. 2016), pp. 280-282.
25. A. Degiron and T. W. Ebbesen, "The role of localized surface plasmon modes in the enhanced transmission of periodic subwavelength apertures," *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **7**, S90 (2005).
26. B. K. Singh and A. C. Hillier, "Surface plasmon resonance enhanced transmission of light through gold-coated diffraction gratings," *Anal. Chem.* **80**, 3803-3810 (2008).
27. J. A. Jackman, A. R. Ferhan, and N. J. Cho, "Nanoplasmonic sensors for biointerfacial science," *Chem. Soc. Rev.* **46**, 3615-3660 (2017).