(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2025-0090625
(43) 공개일자 2025년06월20일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01N 21/552 (2014.01) *C23C 14/14* (2006.01)
C23C 14/30 (2006.01) *C23C 14/58* (2006.01)
B82Y 15/00 (2017.01) *B82Y 40/00* (2017.01)
(52) CPC특허분류
G01N 21/554 (2013.01)
C23C 14/14 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2023-0180454
(22) 출원일자 2023년12월13일
심사청구일자 2023년12월13일

(71) 출원인
부산대학교 산학협력단
부산광역시 금정구 부산대학로63번길 2 (장전동, 부산대학교)
한림대학교 산학협력단
강원도 춘천시 한림대학길 1, 한림대학교(옥천동)
(72) 발명자
오진우
부산 금정구 부산대학로63번길 2
이종민
강원특별자치도 춘천시 봉의산길22번길 16
(74) 대리인
김종석

전체 청구항 수 : 총 17 항

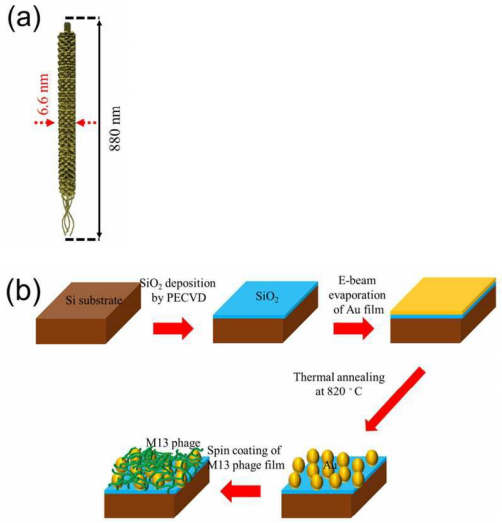
(54) 발명의 명칭 **M13 박테리오파지를 포함하는 표면 플라즈몬 공명 센서 및 이의 제조방법**

(57) 요 약

본 발명은 M13 박테리오파지를 포함하는 표면 플라즈몬 공명 센서 및 이의 제조방법에 관한 것으로, 보다 구체적으로는 반도체 기판, SiO_2 박막, 금 나노입자 및 M13 박테리오파지를 포함하는 표면 플라즈몬 공명 센서 및 이의 제조방법에 관한 것이다.

본 발명은 금 나노입자의 하단이 아닌 상단에 M13 박테리오파지가 존재하면서도 충분한 전자기장 증강 효과를 가지는 표면 플라즈몬 공명 센서를 제공할 수 있다. 또한, 본 발명은 전체 공정 과정의 중간이 아닌 마지막에 M13 박테리오파지 스핀 코팅을 수행하여 M13 박테리오파지에 고온, 플라즈마 및 화학약품의 노출을 최소화함으로써 이의 기능성을 보존할 수 있는 표면 플라즈몬 공명 센서의 제조방법을 제공할 수 있다.

대 표 도 - 도1



(52) CPC특허분류
C23C 14/30 (2013.01)
C23C 14/5806 (2013.01)
B82Y 15/00 (2013.01)
B82Y 40/00 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1485019156
과제번호 ARQ202201587002
부처명 환경부
과제관리(전문)기관명 한국환경산업기술원
연구사업명 지중환경오염위해관리기술개발사업(예타)
연구과제명 친환경-생분해 박테리오파지 나노구조 센서 기반 휴대용 토양오염물질 측정 IoT디바이스 개발
기 여 율 1/1
과제수행기관명 한림대학교 산학협력단
연구기간 2023.01.01 ~ 2023.12.31

명 세 서

청구범위

청구항 1

기판;

상기 기판 위에 증착된 SiO_2 박막;

상기 SiO_2 박막 위에 증착된 금 나노입자; 및

상기 금 나노입자가 증착된 SiO_2 박막 상에 위치하는 M13 박테리오파지;를 포함하는 표면 플라즈몬 공명 센서.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 기판은

실리콘(Si) 웨이퍼인 것을 특징으로 하는 표면 플라즈몬 공명 센서.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 SiO_2 박막은

200 내지 400 ㎚의 두께를 가지는 것을 특징으로 하는 표면 플라즈몬 공명 센서.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 SiO_2 박막은

300 내지 400℃의 온도에서 상기 기판 위에 PECVD(plasma-enhanced chemical vapor deposition) 방법으로 증착되는 것을 특징으로 하는 표면 플라즈몬 공명 센서.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 금 나노입자는

금 박막을 800 내지 840℃의 온도에서 1 내지 3분 동안 어닐링하여 형성되는 것을 특징으로 하는 표면 플라즈몬 공명 센서.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 금 박막은

5 내지 13 nm의 두께를 가지는 것을 특징으로 하는 표면 플라즈몬 공명 센서.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 M13 박테리오파지는

30 내지 55 nm의 두께를 가지는 것을 특징으로 하는 표면 플라즈몬 공명 센서.

청구항 8

실리콘(Si) 웨이퍼를 세척하여 준비하는 단계;

상기 세척한 Si 웨이퍼 위에 SiO_2 박막을 증착하여 SiO_2/Si를 제조하는 단계;

상기 SiO_2/Si 위에 금(Au) 박막을 증착하여 Au/SiO_2/Si를 제조하는 단계;

상기 증착된 금 박막에 열 처리하여 금 나노입자(Au nanoparticles, Au NPs)를 형성하는 Au NPs/SiO_2/Si를 제조하는 단계;

M13 박테리오파지 현탁액을 준비하는 단계; 및

상기 M13 박테리오파지 현탁액을 6 내지 10 mg/mL의 농도로 상기 Au NPs/SiO_2/Si에 스핀 코팅하여 M13 박테리오파지 박막을 제조하는 단계;를 포함하는 표면 플라즈몬 공명 센서의 제조방법.

청구항 9

제8항에 있어서,

상기 실리콘(Si) 웨이퍼를 세척하여 준비하는 단계;는

상기 Si 웨이퍼를 아세톤, 메탄올 및 이소프로필 알코올의 순서로 세척하는 것을 특징으로 하는 표면 플라즈몬 공명 센서의 제조방법.

청구항 10

제8항에 있어서,

상기 세척한 Si 웨이퍼 위에 SiO_2 박막을 증착하여 SiO_2/Si를 제조하는 단계;는

상기 세척한 Si 웨이퍼 위에 SiO_2 박막을 300 내지 400℃의 온도에서 PECVD(plasma-enhanced chemical vapor deposition) 방법으로 증착하는 것을 특징으로 하는 표면 플라즈몬 공명 센서의 제조방법.

청구항 11

제8항에 있어서,

상기 SiO_2 박막은

200 내지 400 nm의 두께를 가지는 것을 특징으로 하는 표면 플라즈몬 공명 센서의 제조방법.

청구항 12

제8항에 있어서,

상기 SiO_2/Si 위에 금(Au) 박막을 증착하여 Au/SiO_2/Si를 제조하는 단계;는

상기 SiO_2/Si 위에 전자빔 증발법으로 금(Au) 박막을 증착하는 것을 특징으로 하는 표면 플라즈몬 공명 센서의 제조방법.

청구항 13

제8항에 있어서,

상기 SiO_2/Si 위에 금(Au) 박막을 증착하여 Au/SiO_2/Si를 제조하는 단계;는

금(Au) 박막을 0.05 내지 0.07 nm s^{-1}의 속도로 증착하는 것을 특징으로 하는 표면 플라즈몬 공명 센서의 제조방법.

청구항 14

제8항에 있어서,

상기 증착된 금 박막에 열 처리하여 금 나노입자(Au nanoparticles, Au NPs)를 형성하는 Au NPs/SiO_2/Si를 제조하는 단계;는

상기 증착된 금 박막을 800 내지 840℃의 온도에서 1 내지 3분 동안 열 처리하여 금 나노입자(Au nanoparticles, Au NPs)를 형성하는 것을 특징으로 하는 표면 플라즈몬 공명 센서의 제조방법.

청구항 15

제8항에 있어서,

상기 M13 박테리오파지 현탁액은

Tris-buffered saline(TBS) 버퍼 (37.5 mM NaCl, 12.5 mM Tris, pH 7.5)에 분산되는 것을 특징으로 하는 표면 플라즈몬 공명 센서의 제조방법.

청구항 16

제8항에 있어서,

상기 M13 박테리오파지 박막은

30 내지 55 nm의 두께를 가지는 것을 특징으로 하는 표면 플라즈몬 공명 센서의 제조방법.

청구항 17

제8항 내지 제16항 중 어느 한 항에 따른 방법으로 제조된 표면 플라즈몬 공명 센서.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 M13 박테리오파지를 포함하는 표면 플라즈몬 공명 센서 및 이의 제조방법에 관한 것으로, 보다 구체적으로는 반도체 기판, SiO_2 박막, 금 나노입자 및 M13 박테리오파지를 포함하는 표면 플라즈몬 공명 센서 및 이의 제조방법에 관한 것이다.

[0002] 상기 표면 플라즈몬 공명 센서의 제조방법은 실리콘(Si) 웨이퍼를 세척하여 준비하는 단계; 상기 세척한 Si 웨이퍼 위에 SiO_2 박막을 증착하여 SiO_2/Si를 제조하는 단계; 상기 SiO_2/Si 위에 금(Au) 박막을 증착하여 Au/SiO_2/Si를 제조하는 단계; 상기 증착된 금 박막에 열 처리하여 금 나노입자(Au nanoparticles, Au NPs)를 형성하는 Au NPs/SiO_2/Si를 제조하는 단계; M13 박테리오파지 현탁액을 준비하는 단계; 및 상기 M13 박테리오파지 현탁액을 7 내지 9 mg/mL의 농도로 상기 Au NPs/SiO_2/Si에 스핀 코팅하여 M13 박테리오파지 박막을 제조하는 단계;를 포함한다.

배 경 기 술

[0003] 플라즈몬이란 금속 내의 자유전자가 집단적으로 진동하는 유사 입자를 의미하며, 금속 나노입자에서는 플라즈몬이 표면에 국부적으로 존재하기 때문에 표면 플라즈몬이라고도 불린다. 특히, 표면 플라즈몬 공명(Surface plasmon resonance, SPR)은 평평한 표면에 입사한 빛에 의해 들뜬 상태가 된 표면 플라즈몬의 상태를 의미하며, 나노미터 크기의 금속 구조에서 발생한 표면 플라즈몬을 국소 표면 플라즈몬 공명(Localized surface plasmon resonance, LSPR)이라고 한다. 이러한 국소 표면 플라즈몬 공명(LSPR) 센서는 금속 나노구조의 주위 환경 변화로부터 발생하는 미세한 굴절률 변화를 흡광도의 변화를 통해 측정하는 센싱 기법을 의미한다.

[0004] 한편, M13 박테리오파지는 직경이 ~6.6 nm이고 높이가 ~880 nm인 나노섬유로, 하단과 상단은 pVII, pIX, pVI 및 pIII 코트 단백질의 5~7개 복사본으로 구성되고, pVIII 주요 외피 단백질의 나선형으로 배열된 2700개의 복사본이 신체 표면에 위치한다. 상기 주요 외피 단백질은 유전공학 과정을 통해 조작될 수 있는데, 이러한 유전공학적 조작을 통해 M13 박테리오파지는 광학 나노 구조, 진단, 환경관리, 센서, 태양광 장치 및 나노발전기 등의 다양한 분야에서 활용될 수 있다.

[0005] 종래에는 M13 박테리오파지를 플라즈몬 나노갭의 일부로 통합하여 다양한 분야에 응용하기에 어려움이 있었다. 왜냐하면 일반적인 플라즈모닉 나노구조는 전자기장 증강 효과가 보통 나노입자의 하단에 위치하기 때문에, 기능성 재료 코팅을 전체 공정 과정의 중간에 수행해야만 했다. 또한, 기존의 플라즈모닉 나노구조 제작 방법은 일반적인 반도체 공정 방법에서 차용하였기 때문에 고온, 진공, 플라즈마 및 화학 약품 노출 등의 다양한 한계 상황이 존재한다. 예를 들어 고온, 플라즈마, 화학약품에 노출되면 생체 재료의 단백질 구조가 파괴되어 기능성을 상실할 위험이 크다. 따라서 전체 공정 과정의 중간에 M13 박테리오파지를 비롯한 생체재료를 적용하는 것이 어려운 실정이므로, 전체 공정 과정의 마지막에 기능성 재료 코팅을 수행하여 생체 재료의 기능성을 최대한 보존하는 기술의 필요성이 커지고 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0006] (특허문헌 0001) 대한민국 등록특허공보 제10-1386385호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0007] 본 발명의 목적은 금 나노입자의 하단이 아닌 상단에 M13 박테리오파지가 존재하면서도 충분한 전자기장 증강 효과를 가지는 표면 플라즈몬 공명 센서를 제공하는 것이다.

[0008] 본 발명의 다른 목적은 전체 공정 과정의 마지막에 M13 박테리오파지 스핀 코팅을 수행하여 M13 박테리오파지의 기능성을 보존할 수 있는 표면 플라즈몬 공명 센서의 제조방법을 제공하는 것이다.

[0009] 발명이 이루고자 하는 기술적 과제들은 이상에서 언급한 기술적 과제들로 제한되지 않으며, 언급되지 않은 또

다른 기술적 과제들은 본 발명의 기재로부터 당해 분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 명확하게 이해될 수 있다.

과제의 해결 수단

[0010] 본 발명은 기판; 상기 기판 위에 증착된 SiO_2 박막; 상기 SiO_2 박막 위에 증착된 금 나노입자; 및 상기 금 나노입자가 증착된 SiO_2 박막 상에 위치하는 M13 박테리오파지;를 포함하는 표면 플라즈몬 공명 센서를 제공한다.

[0011] 본 발명에 있어서, 상기 기판은 실리콘(Si) 웨이퍼인 것을 특징으로 한다.

[0012] 본 발명에 있어서, 상기 SiO_2 박막은 200 내지 400 nm의 두께를 가지는 것을 특징으로 한다.

[0013] 본 발명에 있어서, 상기 SiO_2 박막은 300 내지 400℃의 온도에서 상기 기판 위에 PECVD(plasma-enhanced chemical vapor deposition) 방법으로 증착되는 것을 특징으로 한다.

[0014] 본 발명에 있어서, 상기 금 나노입자는 금 박막을 800 내지 840℃의 온도에서 1 내지 3분 동안 어닐링하여 형성되는 것을 특징으로 한다.

[0015] 본 발명에 있어서, 상기 금 박막은 5 내지 13 nm의 두께를 가지는 것을 특징으로 한다.

[0016] 본 발명에 있어서, 상기 M13 박테리오파지는 30 내지 55 nm의 두께를 가지는 것을 특징으로 한다.

[0017] 또한, 본 발명은 실리콘(Si) 웨이퍼를 세척하여 준비하는 단계; 상기 세척한 Si 웨이퍼 위에 SiO_2 박막을 증착하여 SiO_2/Si를 제조하는 단계; 상기 SiO_2/Si 위에 금(Au) 박막을 증착하여 Au/SiO_2/Si를 제조하는 단계; 상기 증착된 금 박막에 열 처리하여 금 나노입자(Au nanoparticles, Au NPs)를 형성하는 Au NPs/SiO_2/Si를 제조하는 단계; M13 박테리오파지 현탁액을 준비하는 단계; 및 상기 M13 박테리오파지 현탁액을 6 내지 10 mg/mL의 농도로 상기 Au NPs/SiO_2/Si에 스핀 코팅하여 M13 박테리오파지 박막을 제조하는 단계;를 포함하는 표면 플라즈몬 공명 센서의 제조방법을 제공한다.

[0018] 본 발명에 있어서, 상기 실리콘(Si) 웨이퍼를 세척하여 준비하는 단계;는 상기 Si 웨이퍼를 아세톤, 메탄올 및 이소프로필 알코올의 순서로 세척하는 것을 특징으로 한다.

[0019] 본 발명에 있어서, 상기 세척한 Si 웨이퍼 위에 SiO_2 박막을 증착하여 SiO_2/Si를 제조하는 단계;는 상기 세척한 Si 웨이퍼 위에 SiO_2 박막을 300 내지 400℃의 온도에서 PECVD(plasma-enhanced chemical vapor deposition) 방법으로 증착하는 것을 특징으로 한다.

[0020] 본 발명에 있어서, 상기 SiO_2 박막은 200 내지 400 nm의 두께를 가지는 것을 특징으로 한다.

[0021] 본 발명에 있어서, 상기 SiO_2/Si 위에 금(Au) 박막을 증착하여 Au/SiO_2/Si를 제조하는 단계;는 상기 SiO_2/Si 위에 전자빔 증발법으로 금(Au) 박막을 증착하는 것을 특징으로 한다.

[0022] 본 발명에 있어서, 상기 SiO_2/Si 위에 금(Au) 박막을 증착하여 Au/SiO_2/Si를 제조하는 단계;는 금(Au) 박막을 0.05 내지 0.07 nm s^{-1}의 속도로 증착하는 것을 특징으로 한다.

[0023] 본 발명에 있어서, 상기 증착된 금 박막에 열 처리하여 금 나노입자(Au nanoparticles, Au NPs)를 형성하는 Au NPs/SiO_2/Si를 제조하는 단계;는 상기 증착된 금 박막을 800 내지 840℃의 온도에서 1 내지 3분 동안 열 처리하여 금 나노입자(Au nanoparticles, Au NPs)를 형성하는 것을 특징으로 한다.

[0024] 본 발명에 있어서, 상기 M13 박테리오파지 현탁액은 Tris-buffered saline(TBS) 버퍼 (37.5 mM NaCl, 12.5 mM Tris, pH 7.5)에 분산되는 것을 특징으로 한다.

[0025] 본 발명에 있어서, 상기 M13 박테리오파지 박막은 30 내지 55 nm의 두께를 가지는 것을 특징으로 한다.

[0026] 또한, 본 발명은 본 발명의 표면 플라즈몬 공명 센서의 제조방법에 따른 방법으로 제조된 표면 플라즈몬 공명 센서를 제공한다.

발명의 효과

[0027] 본 발명은 금 나노입자의 하단이 아닌 상단에 M13 박테리오파지가 존재하면서도 충분한 전자기장 증강 효과를 가지는 표면 플라즈몬 공명 센서를 제공할 수 있다.

[0028] 또한, 본 발명은 전체 공정 과정의 마지막에 M13 박테리오파지 스핀 코팅을 수행하여 M13 박테리오파지의 기능성을 보존할 수 있는 표면 플라즈몬 공명 센서의 제조방법을 제공할 수 있다.

[0029] 본 발명의 효과들은 이상에서 언급한 효과들로 제한되지 않으며, 언급되지 않은 또 다른 효과들은 청구범위의 기재로부터 당업자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

도면의 간단한 설명

[0030] 도 1은 본 발명의 표면 플라즈몬 공명 센서를 제조하는 과정을 나타낸 모식도이다.

도 2는 본 발명의 표면 플라즈몬 공명 센서 내 금 나노입자를 관찰한 SEM 현미경 관찰 결과 및 평균 크기를 분석한 결과이다.

도 3은 M13 박테리오파지 박막 두께에 따른 센서의 표면을 관찰한 결과를 나타낸 그림이다.

도 4는 M13 박테리오파지 박막 두께에 따른 센서의 표면 거칠기를 나타낸 그래프이다.

도 5는 M13 박테리오파지 농도 또는 두께에 따른 센서의 반사율을 측정한 결과를 나타낸 그래프이다.

도 6 및 7은 본 발명의 표면 플라즈몬 공명 센서의 XZ 전기장 진폭 프로파일을 분석한 결과를 나타낸 그림이다.

도 8은 상대 습도 수준에 따른 본 발명의 표면 플라즈몬 공명 센서의 반사 스펙트럼을 나타낸 그래프이다.

도 9는 상대 습도 수준에 따른 본 발명의 표면 플라즈몬 공명 센서의 반사율 및 암시야 이미지를 나타낸 그림이다.

도 10은 표면 플라즈몬 공명 센서의 표준 모델 및 동적 모델을 나타낸 모식도이다.

도 11 및 12는 표면 플라즈몬 공명 센서의 표준 모델에서의 M13 박테리오파지 두께에 따른 반사 스펙트럼을 나타낸 그래프이다.

도 13은 표면 플라즈몬 공명 센서의 동적 모델에서의 M13 박테리오파지 두께에 따른 반사 스펙트럼을 나타낸 그래프이다.

도 14는 동적 모델에서의 상대 습도 수준에 따른 M13 박테리오파지 두께 및 나노입자 간 간격을 나타낸 그래프이다.

도 15는 M13 박테리오파지 두께 및 입자 간 간격에 따른 센서의 XZ 전기장 진폭 프로파일을 분석한 결과를 나타낸 그림이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0031] 본 명세서에서 사용되는 용어는 본 발명에서의 기능을 고려하면서 가능한 현재 널리 사용되는 일반적인 용어들을 선택하였으나, 이는 당 분야에 종사하는 기술자의 의도 또는 판례, 새로운 기술의 출현 등에 따라 달라질 수 있다. 또한, 특정한 경우는 출원인이 임의로 선정한 용어도 있으며, 이 경우 해당되는 발명의 설명 부분에서 상세히 그 의미를 기재할 것이다. 따라서 본 발명에서 사용되는 용어는 단순한 용어의 명칭이 아닌, 그 용어가 가지는 의미와 본 발명의 전반에 걸친 내용을 토대로 정의되어야 한다.

[0032] 다르게 정의되지 않는 한, 기술적이거나 과학적인 용어를 포함해서 여기서 사용되는 모든 용어들은 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 것과 동일한 의미를 가지고 있다. 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥상 가지는 의미와 일치하는 의미를 가지는 것으로 해석되어야 하며, 본 출원에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않는다.

[0033] 수치 범위는 상기 범위에 정의된 수치를 포함한다. 본 명세서에 걸쳐 주어진 모든 최대의 수치 제한은 낮은 수치 제한이 명확히 쓰여져 있는 것처럼 모든 더 낮은 수치 제한을 포함한다. 본 명세서에 걸쳐 주어진 모든 최소의 수치 제한은 더 높은 수치 제한이 명확히 쓰여져 있는 것처럼 모든 더 높은 수치 제한을 포함한다. 본 명세서에 걸쳐 주어진 모든 수치 제한은 더 좁은 수치 제한이 명확히 쓰여져 있는 것처럼, 더 넓은 수치 범위 내의

더 좋은 모든 수치 범위를 포함할 것이다.

[0035] 이하, 본 발명에 대해 상세히 설명한다.

[0037] **M13 박테리오파지를 포함하는 표면 플라즈몬 공명 센서**

[0038] 본 발명은 기판; 상기 기판 위에 증착된 SiO_2 박막; 상기 SiO_2 박막 위에 증착된 금 나노입자; 및 상기 금 나노입자가 증착된 SiO_2 박막 상에 위치하는 M13 박테리오파지;를 포함하는 표면 플라즈몬 공명 센서를 제공한다. 상기 기판은 실리콘(Si) 웨이퍼, 각종 반도체, 유리, 쿼츠 또는 세라믹일 수 있으며, 바람직하게는 실리콘(Si) 웨이퍼일 수 있고, 더욱 바람직하게는 30 nm 이상의 SiO_2가 코팅된 실리콘(Si) 웨이퍼일 수 있다.

[0039] 상기 SiO_2 박막은 상기 기판 위에 증착될 수 있으며, 바람직하게는 300 내지 400℃의 온도에서 상기 기판 위에 PECVD(plasma-enhanced chemical vapor deposition) 방법으로 증착되는 것을 특징으로 할 수 있다. 또한, 상기 SiO_2 박막은 200 내지 400 nm의 두께를 가지는 것을 특징으로 할 수 있으며, 바람직하게는 250 내지 350 nm의 두께를 가지는 것을 특징으로 할 수 있고, 더욱 바람직하게는 300 nm의 두께를 가지는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0040] 상기 금 나노입자는 상기 SiO_2 박막 위에 금 박막을 증착한 후, 상기 금 박막에 열처리를 하여 형성된 금 나노입자일 수 있다. 보다 구체적으로는, 상기 SiO_2 박막 위에 전자빔 증발법으로 금 박막을 증착한 후, 상기 금 박막을 800 내지 840℃의 온도에서 1 내지 3분 동안 열 처리하여 금 나노입자를 형성할 수 있으며, 바람직하게는 상기 금 박막을 810 내지 830℃의 온도에서 1.5 내지 2.5분 동안 열 처리하여 금 나노입자를 형성할 수 있고, 더욱 바람직하게는 상기 금 박막을 820℃의 온도에서 2분 동안 열 처리하여 금 나노입자를 형성할 수 있다.

[0041] 상기 금 박막은 5 내지 13 nm의 두께를 가지는 것을 특징으로 할 수 있고, 바람직하게는 7 내지 11 nm의 두께를 가지는 것을 특징으로 할 수 있고, 더욱 바람직하게는 9 nm의 두께를 가지는 것을 특징으로 할 수 있다. 상기 금 박막은 SiO2 박막 위에 0.05 내지 0.07 nm s^{-1}의 속도로 증착하는 것을 특징으로 할 수 있고, 바람직하게는 0.06 nm s^{-1}의 속도로 증착하는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0042] 상기 M13 박테리오파지는 상기 금 나노입자가 증착된 SiO_2 박막 상에 위치하는 것을 특징으로 할 수 있다. 상기 M13 박테리오파지의 두께는 30 내지 55 nm일 수 있으며, 바람직하게는 35 내지 45 nm일 수 있고, 더욱 바람직하게는 40 nm일 수 있다.

[0043] 상기 M13 박테리오파지의 두께가 30 nm 미만일 경우, 센서가 작은 변화에는 전혀 반응하지 못할 수 있으며, 이는 표면 플라즈몬 공명 센서 주변의 전자기장 증강은 높이 기준으로 가운데에서 나타나기 때문에 가동 범위 안에 필름 두께가 들어가야 하기 때문이다.

[0044] 상기 M13 박테리오파지의 두께가 55 nm를 초과할 경우, 표면 플라즈몬 공명 센서의 최대 가동범위(80 nm)를 넘어서서 센서의 색 변화가 유발되지 않을 수 있다. 이는 M13 박테리오파지의 두께가 과도하여 나노입자를 모두 덮어버리기 때문에 유발되는 문제일 수 있다.

[0045] 상기 표면 플라즈몬 공명 센서는 습도에 반응하는 것을 특징으로 할 수 있으며, 20 내지 50% 상대 습도에 노출될 때 플라즈모닉 특성이 최적화될 수 있다.

[0047] **M13 박테리오파지를 포함하는 표면 플라즈몬 공명 센서의 제조방법**

[0048] 본 발명은 실리콘(Si) 웨이퍼를 세척하여 준비하는 단계; 상기 세척한 Si 웨이퍼 위에 SiO_2 박막을 증착하여 SiO_2/Si를 제조하는 단계; 상기 SiO_2/Si 위에 금(Au) 박막을 증착하여 Au/SiO_2/Si를 제조하는 단계; 상기 증착된 금 박막에 열 처리하여 금 나노입자(Au nanoparticles, Au NPs)를 형성하는 Au NPs/SiO_2/Si를 제조하는 단계; M13 박테리오파지 현탁액을 준비하는 단계; 및 상기 M13 박테리오파지 현탁액을 6 내지 10 mg/mL의 농도로 상기

Au NPs/SiO_2/Si에 스핀 코팅하여 M13 박테리오파지 박막을 제조하는 단계;를 포함하는 표면 플라즈몬 공명 센서의 제조방법을 제공한다.

[0049] 상기 실리콘(Si) 웨이퍼를 세척하여 준비하는 단계;는 실리콘(Si) 웨이퍼를 아세톤, 메탄올, 이소프로필 알코올의 순서로 세척하여 준비하는 단계일 수 있다.

[0050] 상기 세척한 Si 웨이퍼 위에 SiO_2 박막을 증착하여 SiO_2/Si를 제조하는 단계;는 상기 세척한 Si 웨이퍼 위에 두께가 200 내지 400 nm인 SiO_2 박막을 300 내지 400℃의 온도에서 PECVD(plasma-enhanced chemical vapor deposition) 방법으로 증착하여 SiO_2/Si를 제조하는 단계일 수 있으며, 바람직하게는 상기 세척한 Si 웨이퍼 위에 두께가 250 내지 350 nm인 SiO_2 박막을 320 내지 380℃의 온도에서 PECVD(plasma-enhanced chemical vapor deposition) 방법으로 증착하여 SiO_2/Si를 제조하는 단계일 수 있고, 더욱 바람직하게는 상기 세척한 Si 웨이퍼 위에 두께가 300 nm인 SiO_2 박막을 350℃의 온도에서 PECVD(plasma-enhanced chemical vapor deposition) 방법으로 증착하여 SiO_2/Si를 제조하는 단계일 수 있다.

[0051] 상기 SiO_2/Si 위에 금(Au) 박막을 증착하여 Au/SiO_2/Si를 제조하는 단계;는 상기 SiO_2/Si 위에 전자빔 증발법으로 금(Au) 박막을 증착하는 것을 특징으로 할 수 있으며, 상기 금 박막은 5 내지 13 nm의 두께를 가지는 것을 특징으로 할 수 있고, 바람직하게는 7 내지 11 nm의 두께를 가지는 것을 특징으로 할 수 있고, 더욱 바람직하게는 9 nm의 두께를 가지는 것을 특징으로 할 수 있다. 상기 금 박막을 증착하는 속도는 0.05 내지 0.07 nm s^{-1}일 수 있으며, 바람직하게는 0.06 nm s^{-1}일 수 있다.

[0052] 상기 증착된 금 박막에 열 처리하여 금 나노입자(Au nanoparticles, Au NPs)를 형성하는 Au NPs/SiO_2/Si를 제조하는 단계;는 상기 증착된 금 박막을 800 내지 840℃의 온도에서 1 내지 3분 동안 열 처리하여 금 나노입자(Au nanoparticles, Au NPs)를 형성하는 것을 특징으로 할 수 있으며, 바람직하게는 810 내지 830℃의 온도에서 1.5 내지 2.5분 동안 열 처리하여 금 나노입자를 형성하는 것을 특징으로 할 수 있고, 더욱 바람직하게는 820℃의 온도에서 2분 동안 열 처리하여 금 나노입자를 형성하는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0053] 상기 M13 박테리오파지 현탁액을 준비하는 단계;는 M13 박테리오파지를 Tris-buffered saline(TBS) 버퍼 (37.5 mM NaCl, 12.5 mM Tris, pH 7.5)에 분산하여 준비하는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0054] 상기 M13 박테리오파지 현탁액을 6 내지 10 mg/mL의 농도로 상기 Au NPs/SiO_2/Si에 스핀 코팅하여 M13 박테리오파지 박막을 제조하는 단계;는 M13 박테리오파지 현탁액을 이용하여 상기 Au NPs/SiO_2/Si에 스핀 코팅하여 M13 박테리오파지 박막을 제조하는 단계를 의미할 수 있다. 바람직하게는, 상기 M13 박테리오파지 현탁액을 7 내지 9 mg/mL의 농도로 상기 Au NPs/SiO_2/Si에 스핀 코팅할 수 있으며, 더욱 바람직하게는 상기 M13 박테리오파지 현탁액을 8 mg/mL의 농도로 상기 Au NPs/SiO_2/Si에 스핀 코팅할 수 있다.

[0055] 상기 현탁액을 6 mg/mL 미만의 농도로 사용하면 플라즈모닉 나노입자 사이에서 발생하는 전자기장 증강 영역에 가동하지 못할 우려가 있고, 10 mg/mL을 초과한 농도로 사용하면 플라즈모닉 나노입자의 높이를 넘게 코팅되어 플라즈모닉 특성 변화에 기여하지 못할 우려가 있다.

[0056] 상기 M13 박테리오파지 박막의 두께는 30 내지 55 nm일 수 있으며, 바람직하게는 35 내지 45 nm일 수 있고, 더욱 바람직하게는 40 nm일 수 있다.

[0058] 이하, 본 발명의 실시예를 상세히 기술하나, 하기 실시예에 의해 본 발명이 한정되지 아니함은 자명하다.

[0060] **실시예 1. 표면 플라즈몬 공명 센서의 제조**

[0061] M13 박테리오파지를 포함하는 표면 플라즈몬 공명 센서를 제조하기 위해 실시예 1을 실시하였다. 먼저 아세톤, 메탄올, 이소프로필 알코올의 순서로 세정한 실리콘(Si) 웨이퍼를 준비하였다. 상기 Si 웨이퍼 위에 300 nm 두께의 SiO_2 박막을 증착하였으며, 상기 SiO_2 박막은 350℃에서 PECVD(plasma-enhanced chemical vapor

deposition) 방법으로 증착되었다. 상기 SiO_2 박막 위에 9 nm 두께의 금 박막을 증착하였으며, 상기 금 박막은 전자빔 증발법으로 증착되었고, 금 증착 속도는 실온에서 0.06 nm s^{-1}로 유지되었다.

[0062] 상기 SiO_2 박막 및 금 박막이 증착된 Si 웨이퍼 기판을 2 cm × 2 cm의 크기로 잘라 할로겐 램프를 가열원으로 사용하여 열 어닐링 챔버에 넣었다. 상기 열 어닐링 챔버를 2시간 동안 진공 상태로 펌핑하고, 질소 가스를 도입하여 챔버 압력이 1.8 mTorr가 되도록 하였다. 상기 SiO_2 박막 및 금 박막이 증착된 Si 웨이퍼 기판을 820℃에서 2분 동안 어닐링하여 금 나노입자를 형성하였다. 상기 금 나노입자가 형성된 기판을 세척한 후 질소 가스로 건조하였다.

[0063] 다음으로, Tris-buffered saline(TBS) 버퍼 (37.5 mM NaCl, 12.5 mM Tris, pH 7.5)에 분산하여 M13 박테리오파지 현탁액을 제조하였다. 상기 M13 박테리오파지 현탁액을 상기 금 나노입자가 형성된 기판에 8 mg/mL의 농도로 스핀 코팅하여 최종 표면 플라즈몬 공명 센서를 제조하였다. 상기 실시예 1의 M13 박테리오파지를 도 1a에 모식도로 나타내었으며, 표면 플라즈몬 공명 센서의 제조방법은 도 1b에 모식도로 나타내었다.

[0065] **비교예 1. M13 박테리오파지를 포함하지 않는 표면 플라즈몬 공명 센서의 제조**

[0066] M13 박테리오파지를 포함하지 않는 표면 플라즈몬 공명 센서를 제조하기 위해 비교예 1을 실시하였다. 상기 실시예 1과 동일하게 Si 웨이퍼 위에 SiO_2 박막을 증착하였고, 상기 SiO_2 박막 위에 금 박막을 증착한 후 금 나노입자를 형성하여 M13 박테리오파지를 포함하지 않는 표면 플라즈몬 공명 센서를 제조하였다.

[0068] **비교예 2. M13 박테리오파지를 6 mg/mL의 농도로 스핀 코팅한 표면 플라즈몬 공명 센서의 제조**

[0069] M13 박테리오파지를 6 mg/mL의 농도로 스핀 코팅한 표면 플라즈몬 공명 센서를 제조하기 위해 비교예 2를 실시하였다. 상기 실시예 1과 동일하게 Si 웨이퍼 위에 SiO_2 박막을 증착하였고, 상기 SiO_2 박막 위에 금 박막을 증착한 후 금 나노입자를 형성하였다. 이후, 상기 금 나노입자가 형성된 기판에 M13 박테리오파지 현탁액을 6 mg/mL의 농도로 스핀 코팅하였다.

[0071] **비교예 3. M13 박테리오파지를 10 mg/mL의 농도로 스핀 코팅한 표면 플라즈몬 공명 센서의 제조**

[0072] M13 박테리오파지를 10 mg/mL의 농도로 스핀 코팅한 표면 플라즈몬 공명 센서를 제조하기 위해 비교예 3을 실시하였다. 상기 실시예 1과 동일하게 Si 웨이퍼 위에 SiO_2 박막을 증착하였고, 상기 SiO_2 박막 위에 금 박막을 증착한 후 금 나노입자를 형성하였다. 이후, 상기 금 나노입자가 형성된 기판에 M13 박테리오파지 현탁액을 10 mg/mL의 농도로 스핀 코팅하였다.

[0074] **실험예 1. 금 나노입자의 형태 및 평균 크기 분석**

[0075] 상기 실시예 1에서 형성된 금 나노입자를 SEM 현미경으로 관찰하고 상기 금 나노입자의 평균 크기를 분석하였다. 그 결과를 도 2에 나타내었다. 도 2c의 스케일바는 200 nm이며, 금 나노입자의 평균 크기는 73.6 nm로 분석되었다(도 2d).

[0077] **실험예 2. M13 박테리오파지 박막 두께에 따른 표면 플라즈몬 공명 센서 특성 분석**

[0079] **2-1. 센서의 표면 관찰 및 표면 거칠기 분석**

[0080] 상기 실시예 1 및 비교예 1 내지 3에서 M13 박테리오파지를 농도별로 제조한 표면 플라즈몬 공명 센서를 도 3a에 모식도로 나타내었다. M13 박테리오파지 현탁액의 농도가 증가할수록 M13 박테리오파지 박막의 두께도 증가하는 것을 확인하였다. 상기 실시예 1 및 비교예 1 내지 3에서 제조한 센서의 표면을 NX10 AFM 시스템(NX10, Park Systems, 대한민국 수원)을 사용하여 관찰하였으며, 그 결과를 도 3b 내지 3e에 그림으로 나타내었다.

[0081] 도 3b 내지 3e를 참조하면, M13 박테리오파지는 금 나노입자 사이 및 그 위 공간을 주로 채우는 것으로 관찰되었다. 또한, M13 박테리오파지의 농도가 6, 8 또는 10 mg/mL 일 때, M13 박테리오파지의 두께는 각각 30, 40 또는 50 nm로 확인되었다.

[0083] 다음으로, 상기 실시예 1 및 비교예 1 내지 3에서 제조한 센서의 표면 거칠기를 분석하였으며, 그 결과는 도 4에 그래프로 나타내었다. 도 4를 참조하면, 상기 비교예 1(0 mg/mL)의 표면 거칠기는 23.4 nm였고, 상기 비교예 2(6 mg/mL)의 표면 거칠기는 13 nm였으나, 상기 실시예 1(8 mg/mL)의 표면 거칠기는 11.8 nm로 표면 거칠기가 향상되었다. 하지만, 상기 비교예 3(10 mg/mL)의 표면 거칠기는 23.8 nm로 다시 저하되었다.

[0085] **2-2. 반사율 분석**

[0086] 상기 실시예 1 및 비교예 1 내지 3에서 제조한 센서의 반사율을 분석하였으며, 상기 반사율은 백색 반사율 표준을 참조하여 광섬유 분광계(US/USB4000, Ocean Optics, Dunedin, FL, USA)를 사용하여 분석되었다. 상기 반사율을 측정한 결과는 도 5a에 그래프로 나타내었다.

[0087] 도 5a를 참조하면, 상기 비교예 1 (Au NPs on substrate), 비교예 2 (6 mg/mL), 실시예 1 (8 mg/mL) 및 비교예 3 (10 mg/mL)의 더 긴 파장의 공명 피크 위치는 각각 620, 670, 690 및 703 nm로 확인되었다. 즉, M13 박테리오파지의 농도를 증가시킴에 따라 더 긴 파장 공명 피크 위치가 길어지는 것을 확인하였다.

[0089] 다음으로, 입자 간 간격이 10 nm(Au NPs/SiO2/Si)인 주기적인 나노입자 모델이 실험 데이터(도 5a)와 매우 일치한다는 것을 발견하였다. 기본 설계로서 시뮬레이션된 주기 모델과 실험 데이터는 기판의 Au NP와 매우 일치하였다. 이를 기본 설계로 유지하면서 우리는 10 nm 단계에서 30~50 nm 범위의 테스트를 통해 M13 박테리오파지의 두께를 시뮬레이션하였다. 그 결과, 실험(도 5a)과 시뮬레이션(도 5b) 사이의 반사 스펙트럼 추세는 매우 일치하므로 M13 박테리오파지 농도에 따라 이의 두께를 예측하였으며, 이를 도 5c에 그래프로 나타내었다. 도 5c를 참조하면, M13 박테리오파지를 0, 6, 8 및 10 mg/mL의 농도로 사용한 경우, M13 박테리오파지 박막의 두께는 각각 0, 30, 40 및 50 nm로 예측되었다.

[0091] **2-3. XZ 전기장 진폭 프로파일(XZ electric field amplitude profiles) 분석**

[0092] 상기 실시예 1 및 비교예 1의 센서의 XZ 전기장 진폭 프로파일을 분석하였다. XZ 전기장 진폭 프로파일을 포착하기 위해 단면 전력 모니터를 표면 플라즈몬 공명 센서 가까이에 배치했다. 평면파 소스 위에 위치한 전력 모니터는 반사 스펙트럼을 기록하였다. 시뮬레이션된 영역 전체에 5 nm의 일반적인 메쉬 크기가 적용되었으며, 센서 영역 부근에는 0.5 nm의 메쉬 재정의가 적용되었다. 금 나노입자 직경 "D"를 70 nm로 선택했고, 나노입자 사이의 입자 간 간격은 10 nm로 설정하였다. 상기 실험예 2-3의 결과를 도 6 및 7에 그림으로 나타내었다. 도 6은 NP 모드 기반 특성을 나타내었고, 도 7은 갭(gap) 모드 기반 특성을 나타내었다.

[0093] 도 6 및 7을 참조하면, NP 모드 기반의 경우 근거리 강도가 낮았으며, 갭 모드 기반의 경우 근거리 강도가 높았다. 또한, M13 박테리오파지로 코팅된 표면 플라즈몬 공명 센서의 갭 모드 전기장 강도가 일부 감소한 것은 주변 환경의 변화로 인해 발생하였다.

[0095] **실험예 3. 표면 플라즈몬 공명 센서의 동적 반응 분석**

[0096] 습도에 따른 표면 플라즈몬 공명 센서의 동적 반응을 분석하기 위해 실험예 3을 실시하였다. 상기 실험예 3에서 사용한 표면 플라즈몬 공명 센서는 상기 비교예 3과 동일하게 제조하였다.

[0098] **3-1. 반사 스펙트럼 분석**

[0099] 상기 제조한 센서에 20, 60 또는 90% 수준의 상대 습도 백분율(Relative humidity %, RH %)을 노출시킨 후 반사 스펙트럼을 측정하였다. 도 8a에서는 습도 수준에 따른 센서의 모식도를 나타내었으며, 도 8b에 상대 습도에

따른 반사 스펙트럼을 측정한 결과를 그래프로 나타내었다.

[0100] 도 8b를 참조하면, 약 ~500 nm의 짧은 파장에서는 상대 습도에 따른 공명 피크 위치의 유의미한 이동이 발견되지 않았다(검은색 실선 화살표 참조). 하지만, 더 긴 파장의 공명 위치에서는 상대 습도에 따라 명확한 적색편이(redshift)가 관찰되었다(검은색 점선 화살표 참조).

[0102] **3-2. 반사율 및 암시야 이미지 분석**

[0103] 상기 제조한 센서에 20, 60 또는 90% 수준의 상대 습도 백분율(Relative humidity %, RH %)을 노출시킨 후 반사율 및 암시야 이미지를 분석하였다. 상기 반사율을 분석한 결과를 도 9a에 나타내었고, 상기 암시야 이미지를 분석한 결과를 도 9b에 나타내었다.

[0104] 도 9a 및 9b를 참조하면, 상대 습도 수준에 따라 센서의 광학 색상이 변하는 것을 관찰하였다.

[0106] **실험예 4. 표준 및 동적 모델에서의 표면 플라즈몬 공명 센서의 특성 분석**

[0107] 표면 플라즈몬 공명 센서의 표준 및 동적 시뮬레이션 모델을 통해 본 센서의 특성을 분석하였으며, 상기 표준 및 동적 모델을 도 10에 모식도로 나타내었다. 도 10에서 화살표 왼쪽에 위치한 그림은 상대 습도 20%에 노출된 센서를 나타내며, 화살표 오른쪽에 위치한 그림은 상대 습도 90%에 노출된 센서를 나타내었다. 상대 습도 20% 시의 입자 간 간격 거리를 g_1으로 표시하였고, 상대 습도 90% 시의 입자 간 간격 거리를 g_2로 표시하였다. 표준 모델의 경우에는 $g_1=g_2$인 것을 특징으로 하고, 동적 모델의 경우에는 $g_1 > g_2$인 것을 특징으로 한다.

[0109] **4-1. 표준 모델**

[0110] 표준 모델에서의 반사 스펙트럼을 측정하였으며, 그 결과를 도 11에 나타내었다. 도 11을 참조하면, M13 박테리오파지 두께(t)가 90 nm가 될 때까지 파장 공명이 발생하였고(λ_R = 731 nm), 그 이후에는 거의 일정해졌다. 상기 표준 모델의 반사 스펙트럼 결과(Simulation 범례 참조)를 도 12에서도 나타내었다. 도 12를 참조하면, 실험 모델에서는 M13 박테리오파지 두께(t)가 약 85 nm가 될 때 까지 파장 공명이 발생하였고(λ_R = 751 nm), 그 이후에는 거의 일정해졌다.

[0112] **4-2. 동적 모델**

[0113] 동적 모델에서의 반사 스펙트럼을 측정하였으며, 그 결과를 도 13 및 14에 나타내었다. 도 14에서 공명 파장(λ_R)을 세 구간으로 나누어 구분하였다. 첫 번째 구간은 상대 습도가 20~50%인 구간(이하, “구간 ①”로 표시)이고, 두 번째 구간은 상대 습도가 50~70%인 구간(이하, “구간 ②”로 표시)이고, 세 번째 구간은 상대 습도가 70~90%인 구간(이하, “구간 ③”로 표시)이다. 또한, 도 14에서 동적 모델의 M13 박테리오파지 두께(t)를 빨간색 점선으로 표시하였으며, 동적 모델의 입자 간 간격(gap)을 파란색 점선으로 표시하였다.

[0114] 도 14의 구간 ①을 참조하면, 실험 모델 λ_R의 적색 편이가 703~711 nm에서 조정 가능했으며, 이는 시뮬레이션 모델과 값(700~714 nm)이 매우 일치하였다. 또한, 구간 ①에서 예상되는 M13 박테리오파지의 두께(t)는 50~55 nm로 다양하였으며, 입자 간 간격(gap)은 크게 변화되지 않았다.

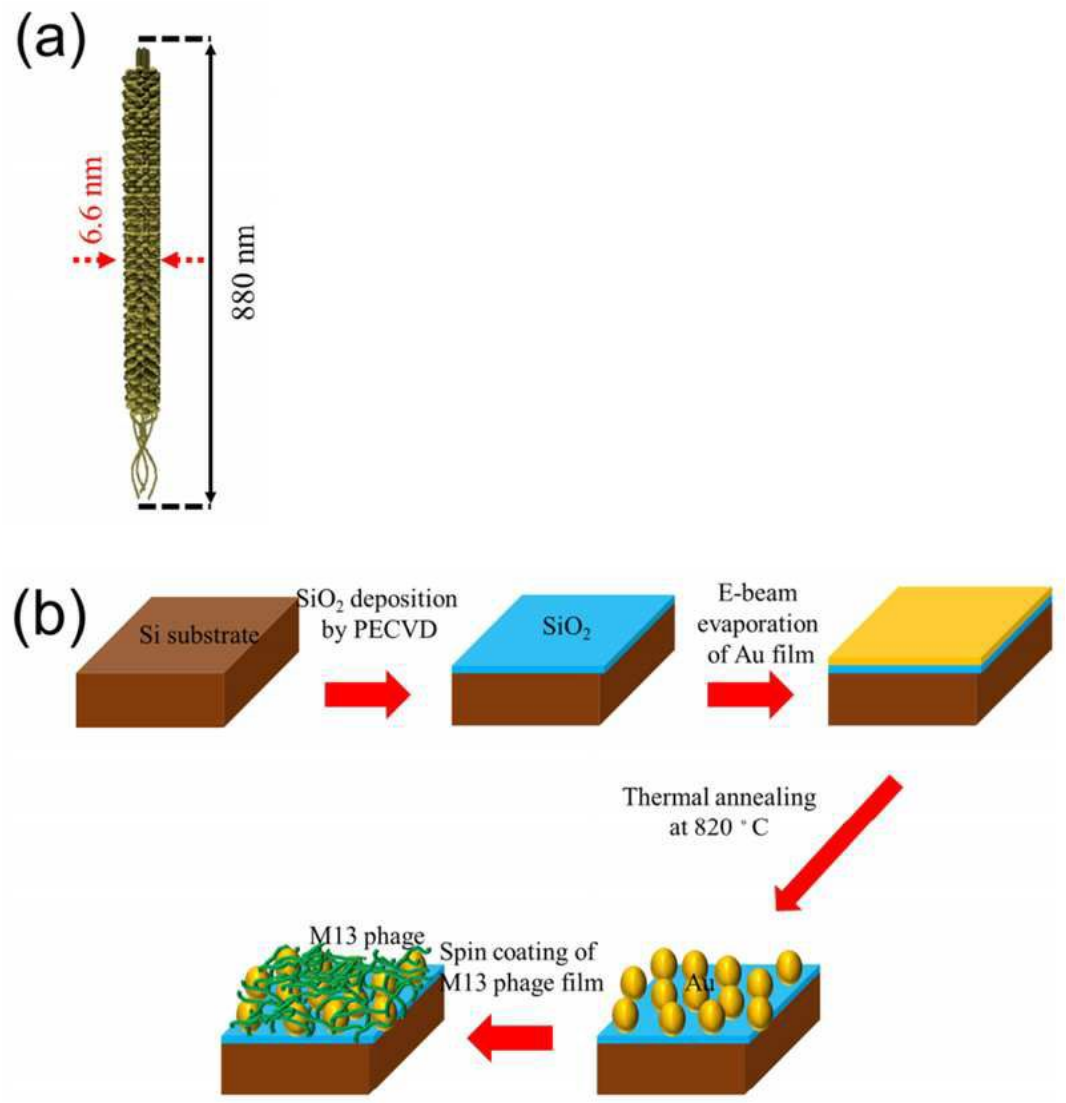
[0115] 도 14의 구간 ②를 참조하면, 실험 모델 λ_R의 급격한 적색 편이(711~751 nm)가 나타났다. 또한, 구간 ②에서 예상되는 M13 박테리오파지의 두께(t)는 55~72.5 nm로 다양하였으며, 상대 습도가 50%에서 70%로 증가함에 따라 입자 간 간격(gap)가 9 nm에서 7.5 nm로 감소하였다. 즉, 감소된 금 나노입자 간 간격과 증가된 M13 박테리오파지 두께의 조합에 의해 λ_R의 급격한 적색 편이가 발생했다고 볼 수 있으며, 이는 상대 습도 수준이 증가함에 따라 유도된 M13 박테리오파지의 팽창은 금 나노입자 간 간격을 감소시키는 것이다.

[0116] 도 14의 구간 ③을 참조하면, 실험 모델 λ_R 및 입자 간 간격은 거의 변동이 없었고, M13 박테리오파지 두께(t)는 72.5~80 nm로 확인되었다.

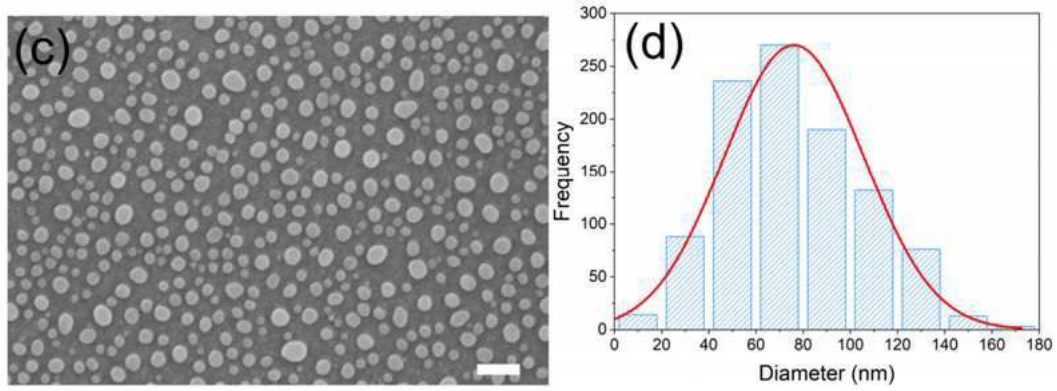
[0118] 이상 설명으로부터, 본 발명에 속하는 기술 분야의 당업자는 본 발명의 그 기술적 사상이나 필수적 특징을 변경하지 않고서 다른 구체적인 형태로 실시될 수 있다는 것을 이해할 수 있을 것이다. 이와 관련하여, 이상에서 기술한 실시예들은 모든 면에서 예시적인 것이며, 한정적인 것이 아닌 것으로서 이해해야만 한다.

도면

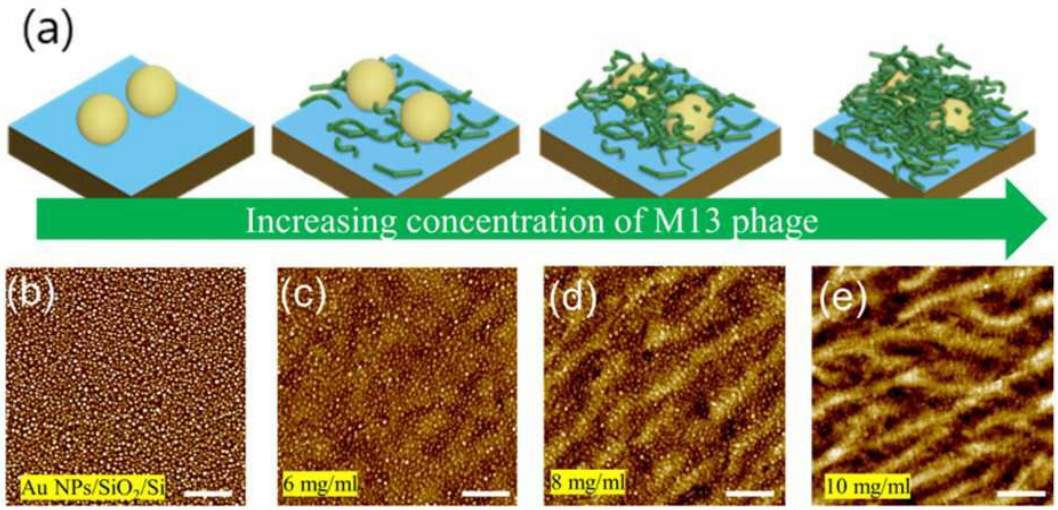
도면1



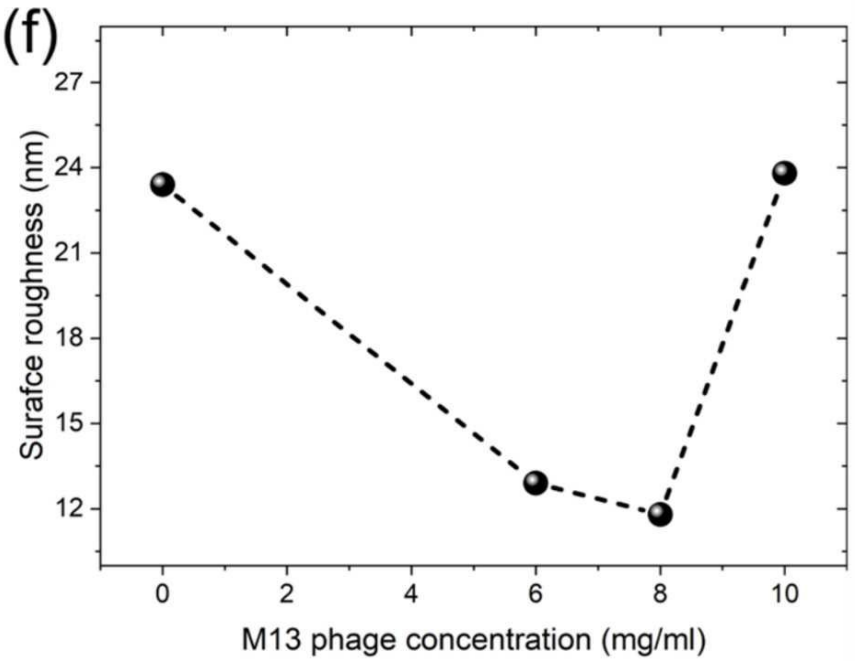
도면2


(c)
(d)
Frequency
Diameter (nm)
0
50
100
150
200
250
300
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180

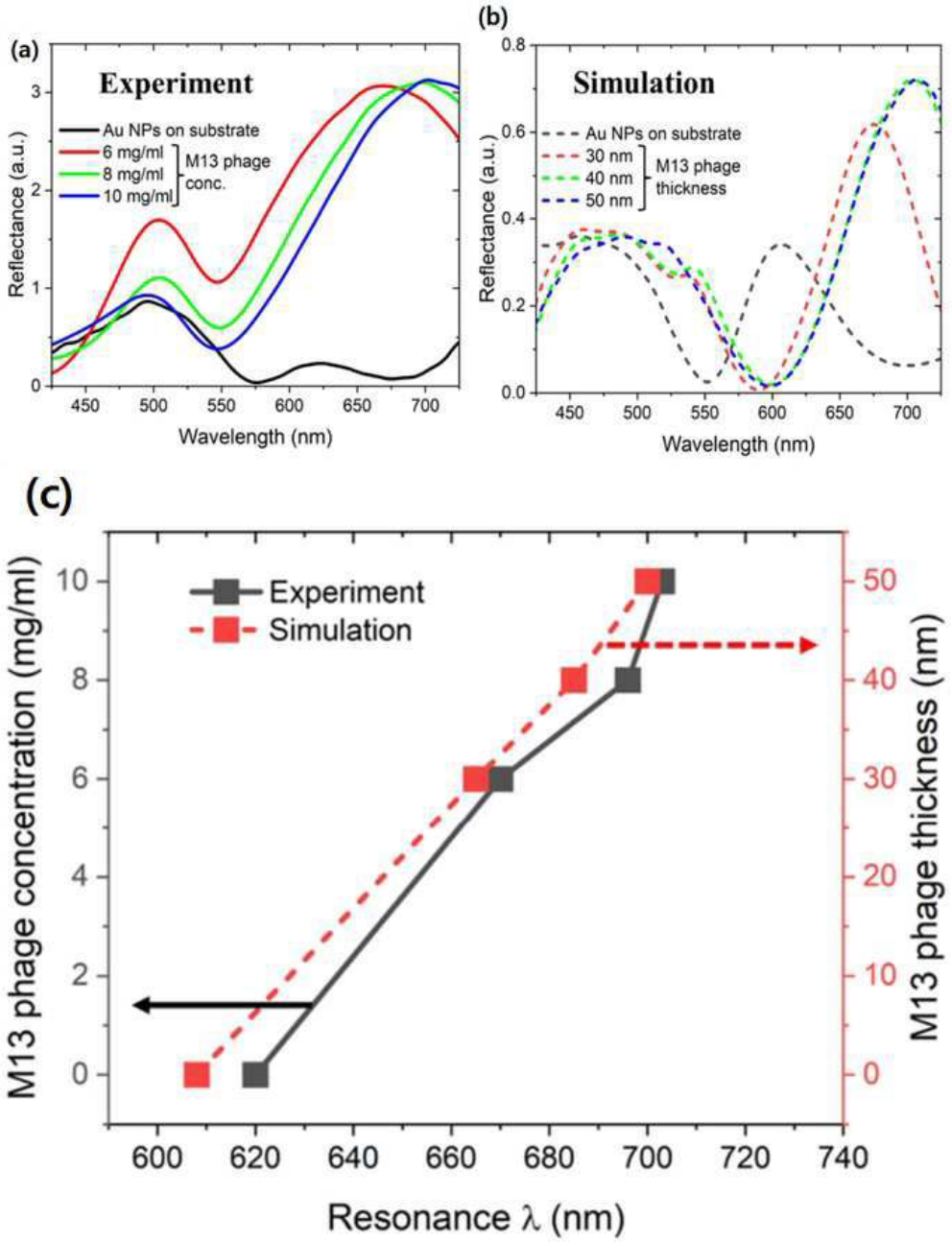
도면3


(a)
Increasing concentration of M13 phage
(b)
Au NPs/SiO2/Si
(c)
6 mg/ml
(d)
8 mg/ml
(e)
10 mg/ml

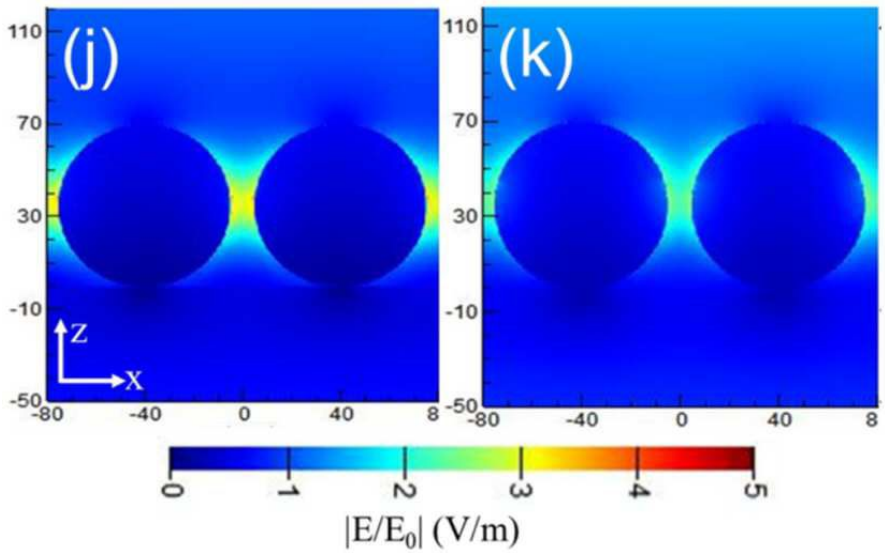
도면4


(f)
Surafce roughness (nm)
M13 phage concentration (mg/ml)
12
15
18
21
24
27
0
2
4
6
8
10

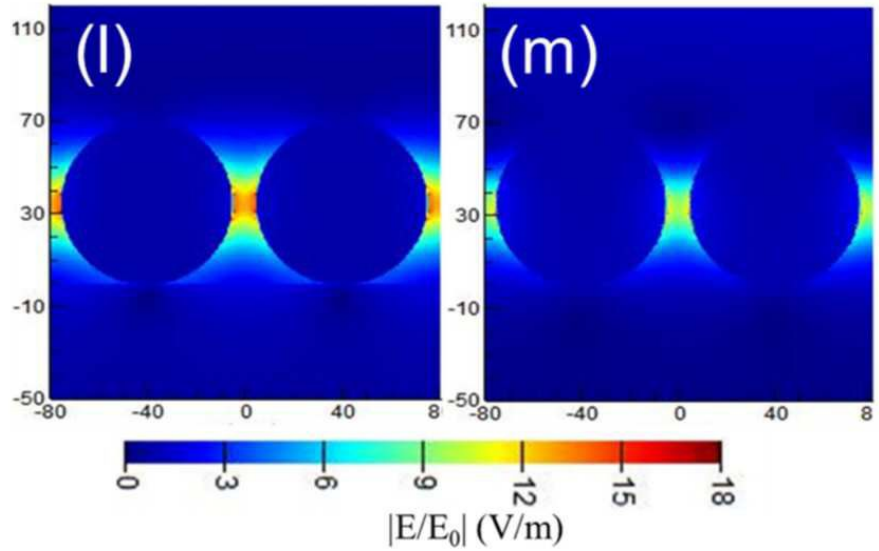
도면5


(a)
Experiment
Au NPs on substrate
6 mg/ml
8 mg/ml
10 mg/ml
M13 phage conc.
Reflectance (a.u.)
Wavelength (nm)
(b)
Simulation
Au NPs on substrate
30 nm
40 nm
50 nm
M13 phage thickness
Reflectance (a.u.)
Wavelength (nm)
(c)
Experiment
Simulation
M13 phage concentration (mg/ml)
M13 phage thickness (nm)
Resonance λ (nm)

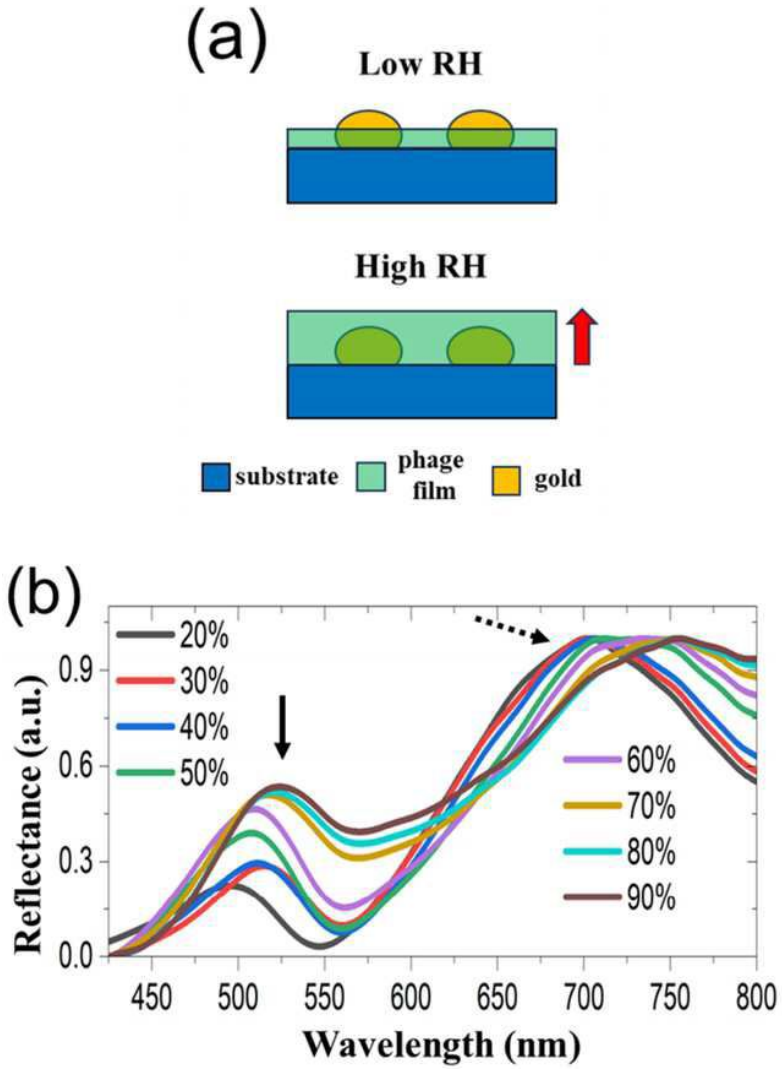
도면6


(j)
(k)
110
70
30
-10
-50
-80
-40
0
40
8
Z
X
0
1
2
3
4
5
|E/E0| (V/m)

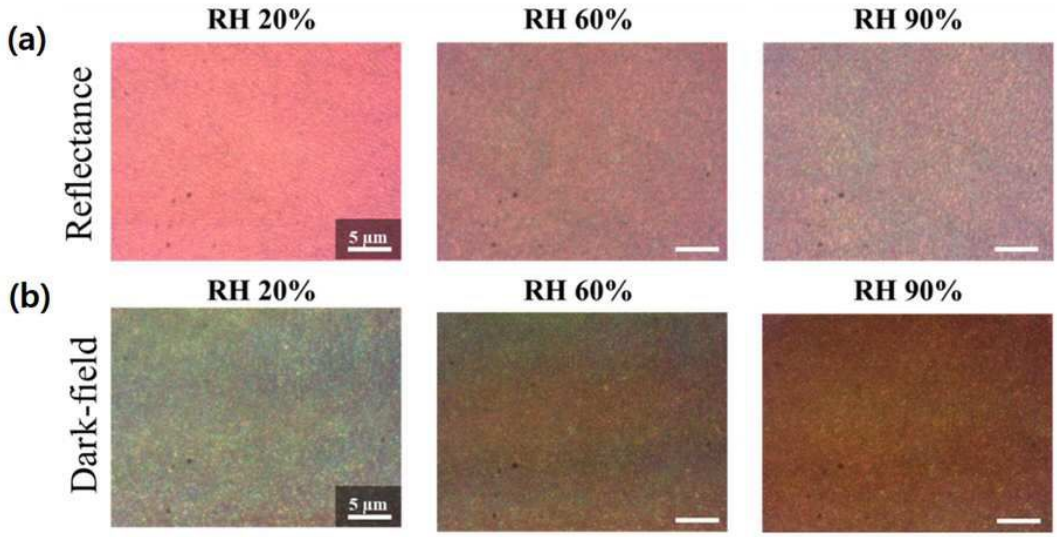
도면7


(l)
(m)
110
70
30
-10
-50
-80
-40
0
40
8
0
3
6
9
12
15
18
|E/E0| (V/m)

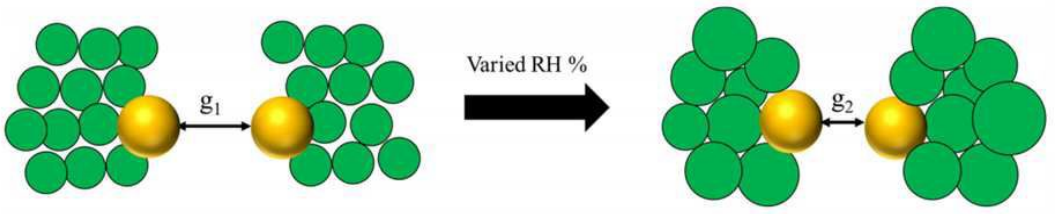
도면8


(a)
Low RH
High RH
substrate
phage film
gold
(b)
Reflectance (a.u.)
Wavelength (nm)
20%
30%
40%
50%
60%
70%
80%
90%

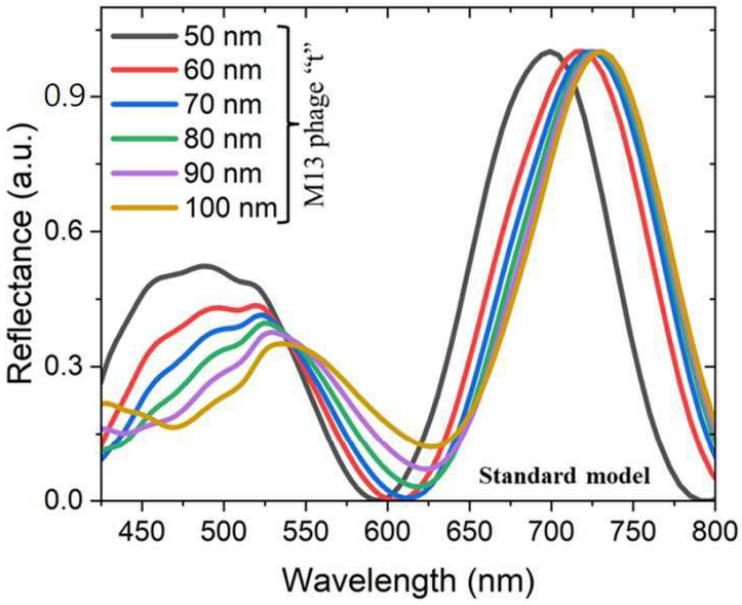
도면9


(a)
Reflectance
RH 20%
RH 60%
RH 90%
5 μm
(b)
Dark-field
RH 20%
RH 60%
RH 90%
5 μm

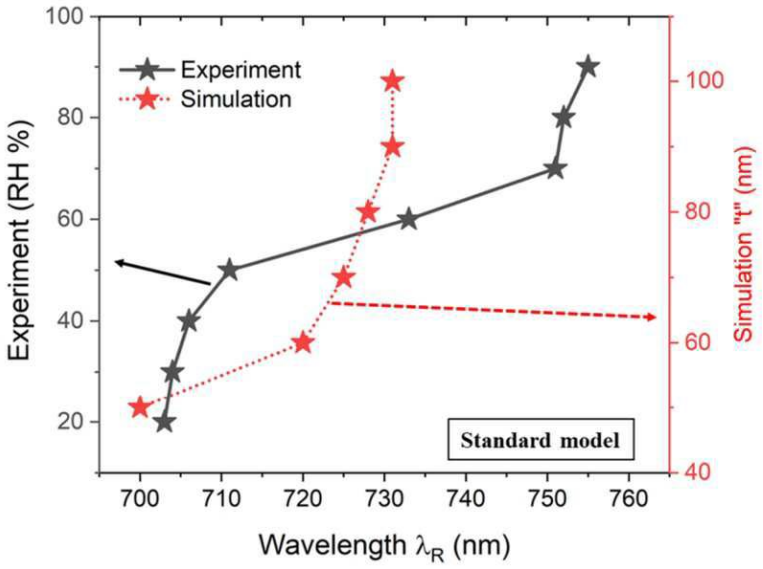
도면10



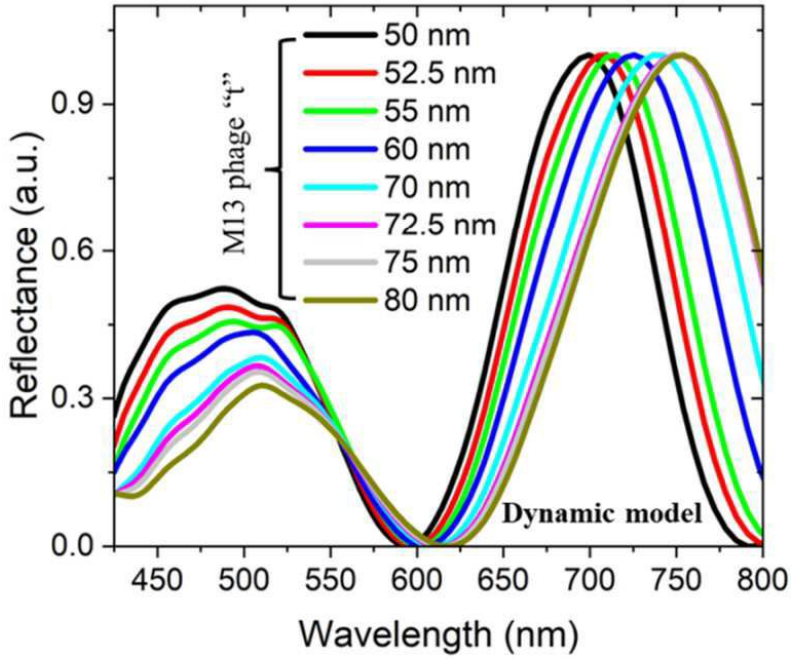
도면11



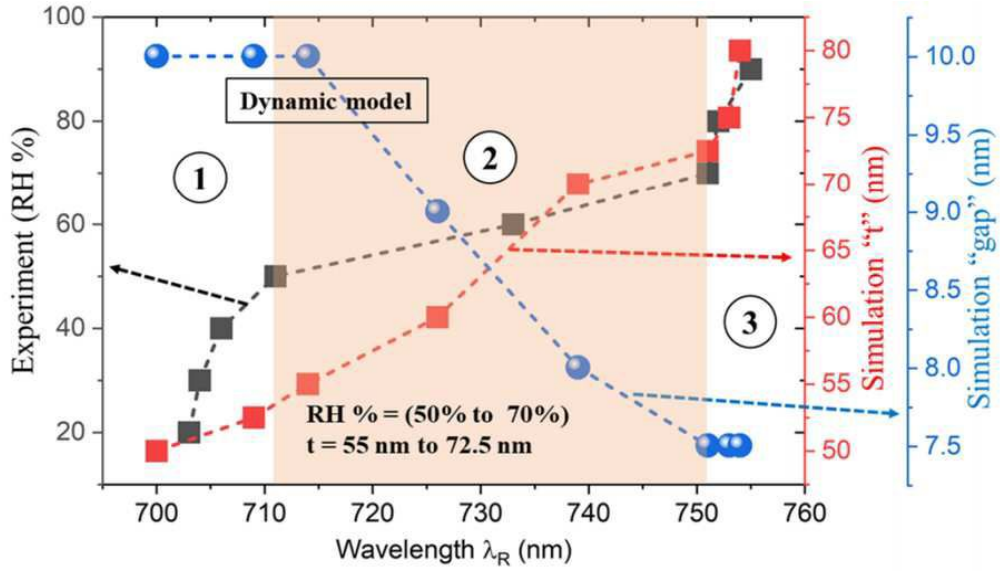
도면12



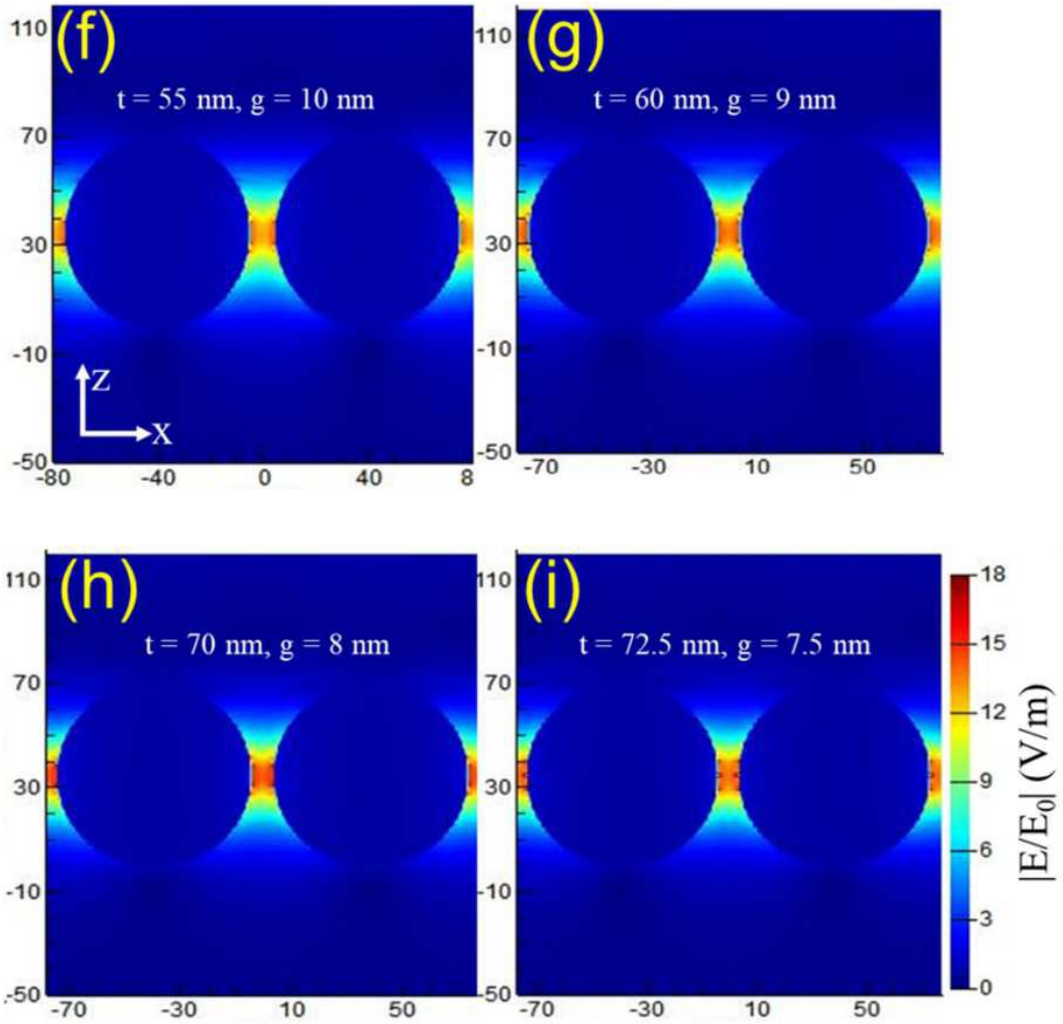
도면13


50 nm
52.5 nm
55 nm
60 nm
70 nm
72.5 nm
75 nm
80 nm
M13 phage "t"
Dynamic model
Reflectance (a.u.)
Wavelength (nm)
0.0
0.3
0.6
0.9
450
500
550
600
650
700
750
800

도면14


Dynamic model
1
2
3
RH % = (50% to 70%)
t = 55 nm to 72.5 nm
Experiment (RH %)
Simulation "t" (nm)
Simulation "gap" (nm)
Wavelength λR (nm)
100
80
60
40
20
700
710
720
730
740
750
760
80
75
70
65
60
55
50
10.0
9.5
9.0
8.5
8.0
7.5

도면15


(f)
t = 55 nm, g = 10 nm
(g)
t = 60 nm, g = 9 nm
(h)
t = 70 nm, g = 8 nm
(i)
t = 72.5 nm, g = 7.5 nm
z
x
110
70
30
-10
-50
-80
-40
0
40
-70
-30
10
50
18
15
12
9
6
3
0
|E/E0| (V/m)