(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2023-0041540
(43) 공개일자 2023년03월24일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01N 21/88 (2006.01) *G01N 21/64* (2006.01)
G01N 21/95 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01N 21/8851 (2013.01)
G01N 21/6458 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2021-0125295
(22) 출원일자 2021년09월17일
심사청구일자 2021년09월17일

(71) 출원인
울산과학기술원
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(72) 발명자
김제형
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
문종성
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(74) 대리인
특허법인(유한)아이시스

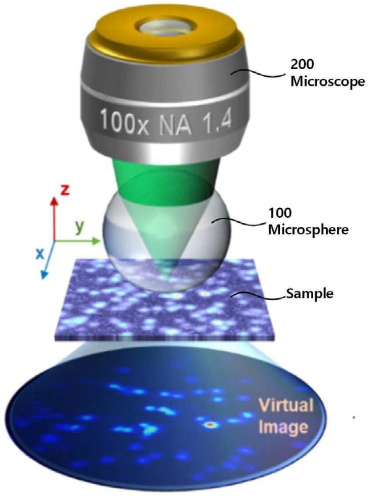
전체 청구항 수 : 총 13 항

(54) 발명의 명칭 **고체 큐빗 이미징 장치**

(57) 요 약

본 실시예에 의한 이미징 장치는, 샘플 내에 위치하여 단일 광자와 양자 스핀을 제공하는 결함(defect) 상에 배치된 미소구체(microsphere); 상기 미소구체에 광을 제공하고, 상기 미소구체를 통하여 상기 결함을 이미징하는 광학계 및 상기 결함에서 형성된 광을 제공받고, 상응하는 전기적 신호로 변환하는 신호 처리부를 포함한다.

대 표 도 - 도2



(52) CPC특허분류
G01N 21/8806 (2013.01)
G01N 21/95 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1711134712
과제번호 2019M3E4A1078664
부처명 과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명 한국연구재단
연구사업명 양자컴퓨팅기술개발사업(R&D)
연구과제명 고성능 고체 스핀 큐비트 시스템 연구
기 여 율 1/3
과제수행기관명 울산과학기술원
연구기간 2021.05.01 ~ 2022.02.28
이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1711126340
과제번호 2019-0-00434-003
부처명 과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명 정보통신기획평가원
연구사업명 양자기반 센서 신뢰성 플랫폼 개발사업
연구과제명 양자센서의 고신뢰도 동작을 위한 양자광원 기술 개발
기 여 율 1/3
과제수행기관명 한국과학기술연구원(KIST)
연구기간 2021.01.01 ~ 2021.12.31
이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1711126366
과제번호 2020-0-01606-002
부처명 과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명 정보통신기획평가원
연구사업명 정보통신방송혁신인재양성(R&D)
연구과제명 양자센서 개발 연구를 통한 양자정보 전문인력 양성
기 여 율 1/3
과제수행기관명 부산대학교산학협력단
연구기간 2021.01.01 ~ 2021.12.31

명 세 서

청구범위

청구항 1

샘플에 위치하여 타겟 상에 배치된 미소구체(microsphere);

상기 미소구체에 광을 제공하고, 상기 미소구체를 통하여 상기 타겟을 이미징하는 광학계;

상기 타겟에서 형성된 광을 제공받고, 상응하는 전기적 신호로 변환하는 신호 처리부를 포함하는 이미징 장치.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 미소 구체는,

상기 미소 구체 외부 환경의 굴절율과의 차이가 1.3 내지 1.7인 물질로 이루어진 이미징 장치.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 미소 구체는

바륨타이타네이트($BaTiO_3$) 재질, 용융 실리카(fused silica) 혹은 라임 유리(lime glass) 중 어느 하나의 재질인 이미징 장치.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 타겟은 고체 큐빗인 이미징 장치.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 고체 큐빗은 양자점, 이차원 물질 및 고체 점결함을 포함하는 이미징 장치.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 고체 점결함은 SiC 점결함, HBN 및 다이아몬드 내에 위치한 점결함 중 어느 하나인 이미징 장치.

청구항 7

제6항에 있어서,

상기 다이아몬드 내에 위치한 점 결함은 단일 광자와 양자 스핀을 제공하는 이미징 장치.

청구항 8

제1항에 있어서,

상기 이미징 장치는,

상기 샘플 아래에 형성된 허상을 이미징하는 이미징 장치.

청구항 9

제1항에 있어서,

상기 미소구체는,

상기 미소구체의 굴절율에 비하여 낮은 굴절율을 가지는 침지 오일에 침지된 이미징 장치.

청구항 10

제1항에 있어서,

상기 이미징 장치는,

상기 광을 제공하는 광원과,

상기 결함에서 제공된 광을 수광하여 상응하는 전기적 신호로 형성하는 수광부 및

상기 전기적 신호를 처리하는 신호 처리부를 더 포함하는 이미징 장치.

청구항 11

제10항에 있어서,

상기 광원은 연속파 레이저이고,

상기 수광부는 어밸런치 포토 다이오드를 포함하는 이미징 장치.

청구항 12

제1항에 있어서,

상기 이미징 장치는,

상기 미소구체를 상기 결함 상에 배치하는 광학 트위저(optical tweezer)를 더 포함하고,

상기 광학 트위저는 레이저 광원을 포함하는 이미징 장치.

청구항 13

제1항에 있어서,

상기 광학계는 공초점 현미경인 이미징 장치.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 기술은 이미징 장치와 관련된다.

배 경 기 술

[0002] 결정의 점 결함들(point defects)은 양자 응용 분야에서 중요한 빌딩 블록을 제공한다. 결함 큐빗을 광학적으로 다루기 때문에 효율적인 광학 인터페이스가 중요하다.

[0003] 다이아몬드의 질소 공극(Nitrogen-vacancy) 또는 실리콘 공극 중심과 같은 결정의 광학 활성 점 결함(Optically active point defects)은 반도체 플랫폼에서 양자 기술을 구현하기 위한 후보로 주목을 받고 있다. 이러한 결함은 단일 광자와 실온에서 1ms에 걸친 긴 결맞음성을 가진 스핀을 제공할 수 있다. 최근에는 단일 결함을 넘어 인접한 여러 결함에 접근(address)하는 것이 더욱 중요해지고 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0004] 다수의 선행 연구에서 다중 큐빗 레지스터, 다중 공진 방출기(multiple resonant emitters)의 초복사 방출

(superradiant emission), 자기장 또는 전기장의 광역 이미징(wide-field imaging)을 가능하게 하는 확장 가능한 양자 시스템을 시연하였다. 따라서 여러 인접 결함을 광학적으로 분리하기 위해 고해상도 및 높은 신호 대 잡음비를 가진 광학 인터페이스의 비중이 증가하고 있다. 그러나, 기존의 광학 현미경은 회절 제한 공간 해상도(diffraction-limited spatial resolution) 및 결정, 기판 및 인근 결함 및 시료의 기판에 의한 배경 형광(background fluorescence)으로 인해 벌크 결정의 결함에 접근(address)하는 것이 곤란하다.

[0005] 나노와이어(nanowires), 나노빔(nanobeams), 불스아이(bullseyes), 솔리드 이머젼 렌즈(solidimmersion lenses)와 같은 마이크로/나노포토닉 구조를 제작하여 광추출 효율을 향상시키려는 많은 노력이 있었다. 이러한 구조는 단일 결함의 밝기를 10배 이상으로 극적으로 증가시켰고 Purcell 효과에 의해 복사 재결합 속도를 향상시켰다.

[0006] 그러나 이러한 접근 방식은 다이아몬드와 같은 고경도 재료를 위한 정교한 제조 공정을 필요로 하며, 나노 스케일 장치는 종종 광학 및 스핀 큐빗의 결맞음성을 악화시킨다. 또한, 최대 광학 모드에서 결함을 광자 구조와 결합하기 위해서는 패턴 또는 결함의 정밀한 공간 제어가 필요하다.

[0007] 공간 분해능을 개선하기 위해 근거리장 프로브(near-field probes), 플라즈몬 격자(plasmon gratings), 유도 방출 공핍 현미경(stimulated emission depletion microscopy) 및 푸리에 자기 이미징(Fourier magnetic imaging) 과 같은 다양한 초해상도 기술을 사용할 수 있다. 이러한 기술은 10nm 미만의 공간 해상도에서 상당한 개선을 가져왔지만 제한된 이미징 깊이, 낮은 광학 처리량, 비복사 손실 및 공핍 빔 또는 경사 자기장과 같은 복잡한 광학 시스템과의 결합을 필요로 한다. 따라서 높은 공간 분해능과 높은 신호 대 잡음비로 근접한 결함을 분리하는 것은 여전히 과제로 남아 있으며, 고굴절률 결정을 위한 기존의 공초점 형광 현미경은 광자 수집 효율과 공간 분해능이 제한적이다.

과제의 해결 수단

[0008] 본 실시예에 의한 이미징 장치는: 샘플에 위치하여 타겟 상에 배치된 미소구체(microsphere);상기 미소구체에 광을 제공하고, 상기 미소구체를 통하여 상기 타겟을 이미징하는 광학계; 상기 타겟에서 형성된 광을 제공받고, 상응하는 전기적 신호로 변환하는 신호 처리부를 포함한다.

[0009] 본 실시예의 어느 한 측면에 의하면, 상기 미소 구체는, 상기 미소 구체 외부 환경의 굴절율과의 차이가 1.3 내지 1.7인 물질로 이루어진다.

[0010] 본 실시예의 어느 한 측면에 의하면, 상기 미소 구체는 바륨타이타네이트(BaTiO3) 재질, 용융 실리카(fused silica) 혹은 라임 유리(lime glass) 중 어느 하나의 재질이다.

[0011] 본 실시예의 어느 한 측면에 의하면, 상기 타겟은 고체 큐빗이다.

[0012] 본 실시예의 어느 한 측면에 의하면, 상기 고체 큐빗은 양자점, 이차원 물질 및 고체 점결함을 포함한다.

[0013] 본 실시예의 어느 한 측면에 의하면, 상기 고체 점결함은 SiC 점결함, HBN 및 다이아몬드 내에 위치한 점결함 중 어느 하나이다.

[0014] 본 실시예의 어느 한 측면에 의하면, 상기 다이아몬드 내에 위치한 점 결함은 단일 광자와 양자 스핀을 제공한다.

[0015] 본 실시예의 어느 한 측면에 의하면, 상기 이미징 장치는, 상기 샘플 아래에 형성된 허상을 이미징한다.

[0016] 본 실시예의 어느 한 측면에 의하면, 상기 미소구체는, 상기 미소구체의 굴절율에 비하여 낮은 굴절율을 가지는 침지 오일에 침지된다.

[0017] 본 실시예의 어느 한 측면에 의하면, 상기 이미징 장치는, 상기 광을 제공하는 광원과, 상기 결함에서 제공된 광을 수광하여 상응하는 전기적 신호로 형성하는 수광부 및 상기 전기적 신호를 처리하는 신호 처리부를 더 포함한다.

[0018] 본 실시예의 어느 한 측면에 의하면, 상기 광원은 연속파 레이저이고, 상기 수광부는 어벨런치 포토 다이오드를 포함한다.

[0019] 본 실시예의 어느 한 측면에 의하면, 상기 이미징 장치는, 상기 미소구체를 상기 결함 상에 배치하는 광학 트위저(optical tweezer)를 더 포함하고, 상기 광학 트위저는 레이저 광원을 포함한다.

[0020] 본 실시예의 어느 한 측면에 의하면, 상기 광학계는 공초점 현미경이다.

발명의 효과

[0021] 본 실시예에 의한 미소 구체 보조 공초점 현미경을 사용하여 다이아몬드의 결함에 대한 고해상도, 고대비 이미징을 보여준다. 미소 구체는 최대 λ/5의 공간 분해능과 광학 신호 대 잡음비를 네 배 가량 향상시키는 확대된 허상으로 점 결함에 대한 우수한 광학 인터페이스를 제공한다. 이러한 기능을 통해 종래 기술에 비하여 높은 신호 대비도로 단일 광자 및 기존 공초점 현미경에서 공간적으로 분리할 수 없었던 다중 결함의 단일 스핀에 대한 개별 광학 접근이 가능하다.

[0022] 또한, 결합된 광학 트위저은 또한 미소 구체를 위치 지정하거나 스캔할 수 있는 가능성을 보여준다. 이 접근 방식은 복잡한 제조 및 추가 광학 시스템이 필요하지 않지만, 기성품인 간단한 마이크로 광학을 사용한다. 미소 구체의 이러한 독특한 장점으로 인해 우리의 접근 방식은 더 높은 해상도와 감도로 밀접하게 배치된 결함을 이미징하고 분리하는 효율적인 방법을 제공할 수 있다.

[0023] 본 실시예에 의한 유전체 미소 구체(microsphere)는 종래의 제조 기반 광자 구조 및 초고해상도 기술에 비해 특유한 장점을 제공한다. 우선, 미소 구체는 재료와 크기에서 선택 범위가 넓은 기성 광학 요소로, 단순 분산(dispersion)을 통해 이러한 요소를 결함과 결합(couple)시킬 수 있다. 나아가, 결합된 광학 트위저은 미소구체의 위치 제어와 결함과의 결합 및 결함의 광시야 스캐닝을 위해 미소 구체를 포획하고 이동할 수 있다. 또한, 회절 한계 미만(sub-diffraction-limited) 조명과 소멸파의 원거리 전파에 의해 회절 한계를 넘어 초해상도 이미징이 가능하다는 것이다.

[0024] 미소 구체는 실제 샘플 표면에서 멀리 떨어진 가상 또는 실제 이미지를 형성한다. 공간적으로 변화된 이미지는 샘플 표면 근처에 존재하는 광학 배경 노이즈에서 결함 신호를 분리한다. 고해상도, 고대비 광학 이미징의 이러한 기능을 통해 기존 공초점 현미경에서 공간적으로 분리되지 않은 단일 광자와 단일 스핀을 광학적으로 분리할 수 있다. 따라서 제조가 필요 없는 단순성과 함께 미소 구체는 고체 상태 단일 광자 방출기를 위한 재배치 가능한 효율적인 광학 인터페이스를 제공한다.

도면의 간단한 설명

[0025] 도 1(a)는 본 실시예에 의한 이미징 장치(10)가 광원(300)이 제공하는 광을 이용하여 결함을 이미징하는 것을 개요적으로 도시한 도면이고, 도 1(b)는 본 실시예에 의한 이미징 장치(10)가 광학 트위저(400)에서 제공된 레이저 광을 이용하여 미소 구체(100)을 결함 상에 배치하는 것을 개요적으로 도시한 도면이다.

도 2는 샘플 표면 아래에 허상(virtual image)가 있는 미소구체 보조 이미징 장치의 개요도이다.

도 3은 미소구체가 있는 결함의 수직으로 스캔된 공초점 이미지로, 점선은 미소구체(Microsphere), 샘플 표면(Sample Surface) 및 허상(Virtual Image) 평면을 나타낸다.

도 4(a)는 z = 0 μm(샘플 표면) 및 도 4(b)는 z = - 12 μm(허상 평면)의 서로 다른 수직 평면에서 미소구체가 있는 x-y 스캔된 공초점 이미지를 도시하며. 색상 막대는 초당 kcount 단위의 광발광(PL) 강도를 나타낸다.

도 4(c)는 이미지를 확대하고 소멸장을 결합하는 미소구체의 광학 현상을 도식적으로 표현한 도면이고, 도 4(d)는 샘플의 20 μm 크기 미소구체를 향한 입사 평면파의 수치 시뮬레이션을 나타낸 도면이다. 강도 $||^2$의 대수 색상 맵은 미소구체 바닥에 입사파를 밀접하게 집중시키는 광자 나노제트 효과를 도시한다.

도 5(a)는 종래 기술, 도 5 (b)는 미소구 보조 현미경의 공초점 형광 이미지를 도시한 도면으로, 2개의 이미지가 = 0(미소구체 제외) 및 = -12 μm(미소구체 포함)에서 동일한 x-y 스캔 범위에서 측면 스캔된 결과를 도시한 도면이다. 도 5(b)에서 확대된 이미지는 (a)에서 주황색 점선 상자로 표시된 영역에 해당한. 도 5(c)는 마이크로스피어 보조 현미경의 다른 가상 이미지 평면에서 측정된 배율 계수를 나타낸 도면으로, 실선은 계산된 배율 (z)를 나타낸다. 도 5(d)는 미소구체가 있는 경우(빨간색)와 없는 경우(검은색) 신호 대 잡음비의 비교한 도면으로, 도 5 (a,b)의 노란색 원은 도 5(d)의 비교에 사용된 단일 결함을 나타낸다.

도 6(a)는 종래 기술 도 6(b)는 본 실시예에 따라 미소구체 보조 현미경에서 결함의 (a,b) 공초점 이미지를 나타낸 도면이다. 도 6(b)에서 z = -13 μm의 가상 이미지는 도 6(a)의 기존 공초점 이미지와 비교하기 위해 배율로 다시 조정된다. 도 6(a)에서 S, D 및 T로 표시된 결함은 단일 및 공간적으로 분리되지 않은 이중 및 삼중 결함을 나타낸다. 이러한 결함은 도 6(b)에서 명확하게 구별되고 (D1-2) 및 (T1-3)으로 표시된다. 도 6(c)는 z =

-13um(빨간색 점) 및 z = -17㎛(파란색 점)의 서로 다른 z 위치에서 기존 공초점 현미경(검은색 점) 및 미소구체 보조 현미경에서 얻은 결함 S의 단면 강도 프로파일을 도시하며, 실선은 가우스 함수에 따라 피팅된 선이다. 도 6(d)는 가상 이미지의 z 위치에 따른 단일 결함 S의 공간 해상도 및 정규화 강도를 나타낸 도면으로, 녹색 점선 수평선은 기존 현미경의 회절 한계를 나타낸다. 도 6(e, f)는 각각 도 6(a)의 두 인접 결함 D 및 도 6(b)의 D1-2의 강도 프로파일을 나타낸 도면이다. 도 6(e) 및 도 6(f)의 데이터는 각각 단일 및 2개로 분리된 가우스 함수로 피팅되었다. 도 6(g)는 병합된 결함 D의 최대 피크를 나타내고 도 6(h)는 분리된 결함 D1 및 D2의 각 피크에서 측정된 2차 광자 상관 곡선을 나타낸다. 빨간색 선은 $g^{(2)}(\tau)$ 곡선으로 피팅되었다.

도 7(a) 및 도 7(b)는 미소구체가 없을 때의 단일 결함 및 미소구체가 있을 때 단일 결함의 광학적으로 검출된 자기공명(Optically detected magnetic resonance) 스펙트럼을 나타낸 도면이다. 도 6(c)는 기존 공초점 현미경에서 공간적으로 분리되지 않은 두 개의 결함과 미소구 보조 현미경에서 공간적으로 분리된 결함을 나타내고, (d) 1 및 (e) 2에 대한 약 50G의 자기장을 갖는 ODMR 스펙트럼을 나타낸다. 삽입 이미지는 기존 및 마이크로스피어 보조 현미경에서 동일한 결함의 공초점 매핑 이미지를 나타내고, 공초점 맵의 축척 막대는 200nm를 나타낸다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0026] 이하에서는 첨부된 도면을 참조하여 본 실시예에 의한 이미징 장치(10)를 설명한다. 도 1(a)는 본 실시예에 의한 이미징 장치(10)가 광원(300)이 제공하는 광을 이용하여 타겟을 이미징하는 것을 개요적으로 도시한 도면이고, 도 1(b)는 본 실시예에 의한 이미징 장치(10)가 광학 트위저(400)에서 제공된 레이저 광을 이용하여 미소구체(100)을 타겟 상에 배치하는 것을 개요적으로 도시한 도면이다. 도 1(a)를 참조하면, 광원(300)이 제공한 광은 빔 스플리터(beam splitter, BS)를 거쳐 광학계(200)에 제공된다. 일 실시예로, 광원(300)은 532nm 대역의 연속파(continuous wave) 레이저광을 제공할 수 있다. 또한, 광학계(200)는 공초점 현미경일 수 있다.

[0027] 예시된 실시예에서, 이미징되는 타겟은 고체 큐빗(solid-state cubit)이다. 일 실시예로, 고체 큐빗은 고체 큐빗은 양자점, 이차원 물질 및 고체 점결함 등일 수 있으며, 고체 점결함은 SiC 점결함, HBN 및 다이아몬드 내에 위치한 점결함 중 어느 하나일 수 있다.

[0028] 또한, 일 예로, 점 결함은 결함의 단일 광자와 단일 스핀의 독립적인 접근이 가능한 다이아몬드 내에 위치한 질소 공극 결함, 실리콘 공극 결함, 실리콘 카바이드(SiC) 점 결함일 수 있으나, 이하에서는 용이하고 간결한 설명을 위하여 타겟이 다이아몬드 내의 질소 공극 결함인 것으로 설명한다. 다만, 이는 본 실시예의 설명을 용이하게 하기 위한 것이며, 본 발명의 범위를 제한하고자 하는 것이 아니다.

[0029] 광학계(200)를 통하여 제공된 광은 샘플(sample)의 결함 상에 배치된 미소 구체(100)에 제공될 수 있다. 광은 미소구체(100)를 통하여 샘플(sample)의 결함에 제공되며, 결함은 광원(300)이 제공한 광에 비하여 더 큰 파장을 가지는 광을 형성하여 제공한다. 광학계(200)는 결함이 형성한 광을 집광하고, 이로부터 샘플 아래에 형성된 허상(virtual image)을 획득하여 광 커플러(Fiber coupler)에 제공한다.

[0030] 후술할 바와 같이 샘플(sample) 및 미소 구체(100)는 침지 오일에 침지될 수 있으며, 이미징 장치(10)는 샘플(sample) 및 미소 구체(100)가 침지된 상태에서 이미징을 수행할 수 있다.

[0031] 수광부는 어벨런치 포토 다이오드(APD)를 통하여 허상에 상응하는 광을 수광하고, 상응하는 전기적 신호를 형성하여 FPGA, PC 등의 신호 처리 장치에 제공한다.

[0032] 일 실시예로, 이미징 장치(10)는 RF 생성기(RF Generator)를 더 포함할 수 있으며, RF 생성기는 다이아몬드 점결함 내 전자 스핀 상태와 공명하는 주파수의 마이크로파를 생성시켜 시료에 조사함으로써, 다이아몬드의 NV 점결함 내의 전자의 스핀 상태를 제어하는 역할을 수행한다.

[0033] 도 1(b)는 광학 트위징을 수행하는 과정을 도시한 도면이다. 도 1(b)를 참조하면, 광학 트위저(400)는 레이저 광원을 포함하며, 광학 트위저(400)에서 제공된 광은 광 커플러(Fiber Coupler)와 광학계(200)를 통하여 미소구체(100)에 제공된다.

[0034] 미소구체(100)는 광학 트위저(400)가 제공한 광에 따라 샘플(sample)의 표면을 이동하며, 미소구체(100)가 샘플(sample)의 결함 상에 위치할 때 광학 트위저(400)는 레이저 제공을 중단한다. 이와 같이 미소구체(100)는 샘플(sample)의 결함 상에 배치된다.

[0035] 본 실시예는 유전체 마이크로 광학의 하이브리드 통합에 기초한 결함에 대한 고해상도, 고대비 광학 인터페이스

와 관련된다. N_2 이온을 다이아몬드에 주입하여 1~2㎛$^{-2}$의 밀도로 표면으로부터 100nm 이내에 무작위로 분포된 NV(nitrogen-vacancy) 색상 중심을 생성하는 점 결함을 포함하는 다이아몬드 샘플(sample)을 준비하였다. 미소 구체 보조 공초점 형광 현미경 이미징을 위해 다이아몬드 샘플(sample)에 바륨타이타네이트($BaTiO_3$) 글래스 미소 구체(100)를 분산시켰다. $BaTiO_3$ 미소 구체(100)는 높은 굴절률(n~1.9-2.1)과 10~20um의 직경을 가진다.

[0036] 높은 굴절률을 가지는 구체(100)는 소다석회 유리(soda-lime lass, n~1.51), 폴리스티렌(n~1.59)과 같은 낮은 굴절률 미소 구체보다 다이아몬드(n~2.42)의 결함 이미징에 더 유리하다.

[0037] 일 실시예로, 미소구체의 굴절율은 미소구체 외부 환경의 굴절율을 고려하여 선택한다. 본 실시예와 같이 굴절율이 큰 바륨타이타네이트($BaTiO_3$) 글래스 미소 구체(100)를 이용했을 때에는 침지오일을 사용할 수 있다. 일예로, 본 실시예에서, 미소 구체의 굴절율은 침지 오일의 관계에서 미소구체의 굴절율/외부 환경의 굴절율은 대략 1.3~1.7의 값을 가지도록 설정된다. 다른 예로, 용융 실리카(fused silica) 혹은 라임 유리(lime glass)를 이용하면 침지 오일 없이도 확대된 허상 이미징을 할 수 있다.

[0038] 미소 구체(100)와 다이아몬드 샘플(sample)은 계면에서 내부 전반사를 최소화할 수 있다. 미소 구체(100)와 환경 사이의 굴절률 대비는 미소 구체를 통한 빛의 전파를 결정하기 때문에 이미지에서 중요한 역할을 한다. 환경과의 작은(큰) 굴절률 대비가 샘플 아래(위)의 허상(실상)을 형성한다. 고굴절률 미소 구체의 이점을 유지하면서 환경과의 굴절율 대비를 줄이기 위해 미소 구체(100)를 침지 오일(n=1.518)에 침지시켰다. 이로부터 초고해상도 이미징 기능을 허상 평면에 가져올 수 있다. 나아가 미소 구체와 침지 오일 사이의 작은 굴절률 대비는 계면에서 산란력(scattering force)을 감소시키고 광학 트위저을 이용하여 고굴절율 미소 구체를 포획 가능하게 한다.

[0039] 형광 이미징을 위해 실온에서 공초점 현미경 설정을 사용하였다. 532 nm 연속파 레이저(CW laser)로 샘플을 여기시키고 오일 침지 대물 렌즈(NA=1.4)로 샘플에서 형광을 수집하였다. 이색성 거울(dichroic mirror)을 사용하여 수집된 형광 신호에서 여기 레이저를 대역별로 필터링하고, 50㎛ 핀 홀(pinhole)과 2개의 렌즈를 사용하여 형광 신호를 공간적으로 필터링한 다음 광섬유 결합 실리콘 단일 광자 어밸런치 포토다이오드(Excelitas, SPCM-AQRH)를 이용하였다.

[0040] 도 2는 다이아몬드의 결함을 이미징하기 위한 미소 구체 보조 현미경을 도시한 도면이다. 액체(n~1.518)에 고굴절률 미소 구체를 침지하면 샘플 표면 아래에 결함의 허상(Virtual Image)이 형성된다. 샘플(sample)을 수직으로 스캔하여 미소 구체(100) 렌즈가 있는 상태와 없는 상태에서의 이미지 평면을 결정한다.

[0041] 도 3으로 도시된 미소 구체(100) 외부의 공초점 맵(confocal map)은 다이아몬드 표면 z = 0 근처 결함으로 부터의 형광을 표시하는 반면, 미소 구체 아래의 결함은 z = -12 ㎛ 근처의 아래쪽 평면에서 허상을 형성한다.

[0042] 도 4(a) 및 도 4(b)는 z = 0 및 z = -12 ㎛의 두 가지 다른 이미지 평면에서 x-y 측면 맵을 나타낸다. 도 4(b)의 허상(Virtual Image)은 미소 구체 외부의 샘플 표면(sample surface)에서보다 향상된 대비(contrast)와 해상도로 결함을 눈에 띄게 보여준다.

[0043] 이미지 품질의 향상은 미소 구체의 광학 현상과 관련된다. 도 4(c)에 설명된 것처럼 미소 구체(100)는 구면 렌즈로서 확대된 허상(virtual image)을 생성한다. 배율은 구의 크기, 광학 지수 대비 및 미소 구체에서 결함까지의 거리에 따라 달라진다. 나아가, 미소 구체는 기존의 공초점 현미경에서 회절 한계를 넘어 공간 분해능을 향상시킨다.

[0044] 도 4(c)에 설명된 바와 같이 미소 구체(100)는 고주파 소산파(evanescent waves)를 미소 구체와 표면 사이의 간격($\lambda/2$) 내에서 원거리장 방출(far-field emission)에 결합한다. 이 근거리장 방출(near-field emission)은 구 크기의 1/4 정도의 접촉 영역 근처에서 발생하는 광 추출 및 공간 분해능을 모두 향상시킨다.

[0045] 도 4(d)는 직경이 20㎛인 미소 구체 단면의 $||^2$ 프로파일의 유한차분(finite-difference) 시간 영역 시뮬레이션 결과를 도시한다. 도 4(d)는 소위 광자 나노젯(photonic-nanojet)이라고 하는 회절 한계 미만(sub-diffraction-limited) 조명을 도시한다. 유전체 미소 구체(100)는 회절파 사이에 보강 간섭을 일으킨다. 시뮬레이션에서 미소 구체는 532nm의 조명 파장에 대해 232nm의 빔 허리를 가진 국부적인 지점에 입사파를 집중하였다.

[0046] 정량적 분석을 위해 미소 구체가 있거나 없는 동일한 결함의 이미지를 직접 비교한다. 이 비교는 후술할 바와

같이 미소 구체를 재배치할 수 있기 때문에 가능하다. 도 5(a) 및 도 5(b)는 각각 미소 구체(100)가 없는 경우와 있는 경우의 측면 공초점 맵(lateral confocal map)이다. 동일한 스테이지 스캔 범위에서 미소 구체(100)는 거의 두 배에 달하는 확대된 허상를 보여준다. 미소 구체가 없는 확대되지 않은 공초점 이미지로부터 허상의 배율(M)을 결정한다.

[0047] 도 5(c)는 깊이에 따라 실험적으로 측정된 배율(M)을 도시한다. = -9 ~ -15 μm 범위에서 배율이 1.9에서 2.5로 증가하였다. 구면 렌즈 시스템의 배율은 기하학적 광학을 사용하여 근사화될 수 있다. 구면 수차를 고려하여 미소 구체는 아래의 수학식 1로 표시되는 초점 거리 f(x)를 가진다.

[0048] [수학식 1]

[0049] $$f(x) = \frac{x}{\sin[2\sin^{-1}(x/R) - 2\sin^{-1}(n_r^{-1}(x/R))]}$$

[0050] (x: 광축으로부터의 가로 거리, R은 미소 구체의 반경, $n = \frac{n_{microsphere}}{n_{oil}}$ =1.38은 미소 구체와 오일 사이의 굴절률 비)

[0051] 미소 구체(100)는 샘플 표면에서 거리($d_v = \frac{(R+\delta)f}{f-R-\delta} - R$)에서 허상을 형성한다. 배율은 $M = \frac{R+d_v}{R+\delta}$ 으로 결정되며, 여기서 δ는 샘플 표면의 결함 깊이이다. 위의 식에 따라 R = 10 μm, δ = 100 nm, x = 1 μm 일 때 d_v = -13um 에서 M = 2.28로 허상 평면을 계산할 수 있다. 관찰된 가상 평면에 $M(z) = \frac{R-z}{R+\delta}$ 기초하여 배율은 와 같이 표시될 수 있다. 이와 같이 이론적으로 연산된 결과는 도 5(c)에서 도시된 실험적으로 관찰된 결과와 부합한다.

[0052] 밝기 측면에서 고굴절률 구체는 다이아몬드 표면 근처의 소산파(evanescent waves)를 자유 공간(free space)과 결합한다. 수치 시뮬레이션에서 미소 구체(100) 아래 다이폴(dipole)의 추출 효율이 2배 향상된 것으로 계산되었다. 도시되지 않은 실험예에서 미소 구체가 있는 경우와, 없는 경우에서 동일한 결함의 포화 강도를 비교하여 최대 40%의 밝기 향상을 관찰할 수 있었다.

[0053] 시뮬레이션과 관찰 사이의 불일치는 최대 밝기에 대한 미소 구체의 좁은 공간 윈도우로 인한 것으로 파악된다. 시뮬레이션은 최대 향상이 구 바로 아래에서 약 1μm 내에서 발생하는 것을 보여준다(지원 정보의 그림 S2 참조). 이 윈도우는 미소 구체의 크기를 증가시켜 더 넓힐 수 있다.

[0054] 밝기의 향상은 중간 정도이지만, 미소 구체는 샘플 표면에서와 비교하여 허상에서 배경 형광이 실질적으로 감소하여 신호 대 잡음비의 큰 증가를 가능하게 한다. 단일 광자에서 신호를 제어해야 하므로 높은 신호 대 잡음비를 달성하는 것은 반도체 큐빗 시스템에서 중요하다. 그러나 1mW 근처의 높은 광학 여기 전력을 사용하면 일반적으로 산란된 광자로부터 원치 않는 배경 형광을 생성하고 침지 오일, 호스팅 결정 및 인근 결함과 같은 환경에서 자가형광을 생성한다. 도 3에서 관찰할 수 있는 바와 같이 배경 형광은 샘플 표면 근처의 영역에 비해 허상이 있는 다이아몬드 내부가 상대적으로 더 어둡다. 따라서 샘플 표면에서 이격된 허상의 공간 분리는 광학 배경 노이즈를 방지하는 데 유용하다. 도 4(a)는 동일한 단일 결함(도 5(a) 및 도 5(b)의 노란색 원)에서 미소 구체가 있는 경우 및 없는 경우의 신호 대 잡음비를 비교한다. 결과는 허상에 대해 평균 4배 정도 신호 대 잡음비가 크게 향상되었음을 보여준다.

[0055] 단일 원자 결함의 형광은 이미지의 공간 분해능을 측정하기 위한 완벽한 점확산 기능(point-spread function)으로 작용할 수 있다. 미소 구체를 이용하는 현미경의 공간 해상도를 결정하기 위해 도 3c에서 측정된 M을 사용하

여 허상의 스케일을 보정한다. 도 4a 및 도 4b에서 기존 현미경에서 공간적으로 분해되지 않는 결함 그룹 D 및 T는 미소 구체 보조 현미경에서 각각 D1, D2 및 T1, T3로 분리된 결함으로 잘 분해된다. 이러한 결과는 미소 구체 보조 현미경에서 향상된 분해능을 명확하게 보여준다.

[0056] point-spread 함수의 FWHM(full width at half maximum)을 비교하기 위해 도 6(a) 및 도 6(b)에서 S로 표시된 단일 결함을 선택하고 도 6(c)로 단면 강도 곡선을 도시하였다. 기존의 현미경에서 피팅된 가우스 함수(Gaussian function)의 FWHM은 약 280nm이다. N_2 베이컨시 중심의 넓은 스펙트럼(600 ~ 800 nm)에 대한 700 nm의 중심 파장을 고려하면 값은 ~λ/2.5의 공간 분해능에 상응하며 Abbe 회절 한계 /(2*NA)에 가깝다. 여기서 NA 오일 침지 렌즈의 경우 1.4이다.

[0057] 미소 구체를 사용하는 현미경의 경우 z = -13 및 z = -17 μm에서 두 개의 서로 다른 허상 평면에서 point-spread 함수를 측정하고 각각 188 nm(λ/3.7) 및 142 nm(λ/5)의 FWHM을 달성하였다. 따라서, 미소 구체를 사용하는 현미경은 기존의 현미경에서 회절 한계를 넘는 공간 분해능을 제공한다.

[0058] 도 6(d)는 표면에서의 이미징 깊이에 따른 공간 해상도와 강도를 도시한다. 미소 구체는 z = -12 ~ -13 μm 부근에서 가장 강도가 높은 허상를 형성한다. 이미지 평면이 더 아래로 내려갈수록 더 높은 해상도를 얻을 수 있지만 강도가 감소한다. z = -17 μm에서 λ/5 부근의 분해능을 달성하지만 최대 강도에 비해 강도가 20%로 감소한다. 또한 z = - 17 μm에서 강도 프로파일은 도 6(c)로 도시된 것과 같이 두 개의 어깨 피크를 나타낸다. 이 피크들은 에어리 원반 패턴에서 비롯되며 초점면 dv = =13μm를 통과할 때 더 강해진다.

[0059] 향상된 분해능과 향상된 광학 신호 대비를 통해 기존의 현미경으로 분해되지 않는 근접한 결함을 검사한다. 도 6(e) 및 도 6(f)에서 기존의 현미경 검사법은 결합된 단일 피크로 결함 그룹 D의 강도 프로파일을 보여주는 반면, 미소 구체 보조 현미경 검사법은 도 6(b)의 결함 D1 및 D2에 대해 두 개의 분리된 피크를 보여준다.

[0060] 각 단일 양자 광원은 이상적으로 $g^{(2)}(0) = 0$인 안티번칭 딥(antibunching dip)로 정량화되는 단일 광자 소스로 거동한다. 여러 결함이 공간적으로 겹칠(overlap) 때 값은 $g^{(2)}(0) = 1 - \frac{1}{N}$ 로 증가한다. 여기서 N은 양자 광원의 수이다. 단일 광자 순도를 조사하기 위해 Hanbury Brown 및 Twiss 측정을 사용하여 2차 광자-광자 간 상관관계 $g^{(2)}(\tau)$를 측정하고 다음 방정식 $g^{(2)}(\tau) = 1 - (1 - g^{(2)}(0))(C\exp(-\frac{|\tau|}{\tau_1}) + (1 - C)\exp(-\frac{|\tau|}{\tau_2})$를 사용하여 데이터를 피팅하였다. 여기서 τ_c는 바닥과 여기 상태 사이의 전환과 관련된 시간 상수이다. 단일 결함(S)의 경우 기존 현미경과 미소구 보조 현미경 모두 각각 0.12 ± 0.07 및 0.09 ± 0.06의 예상되었던 낮은 $g^{(2)}(0)$ 값을 보여준다.

[0061] 이어서 근접한 두 개의 결함에 대해 $g^{(2)}(\tau)$를 측정하였다. 결함 그룹 D의 경우 도 6(g)로 도시된 것과 같이 병합된 피크의 최대 강도에서 히스토그램을 기록하고 $g^{(2)}(0) = 0.3 \pm 0.08$을 얻을 수 있었다. 이러한 값은 단일 결함에 비하여 눈에 띄게 증가한 값이다.

[0062] 반면, 도 6(h)로 도시된 것과 같이 공간적으로 분리된 단일 결함 D1 및 D2의 경우 허상의 각 단일 결함 D1 및 D2의 $g^{(2)}(0)$ 값은 각각 0.13±0.06 및 0.16±0.06로 낮게 유지된다. 이러한 높은 단일 광자 순도는 확대된 고해상도 이미징이 인접한 결함의 방출로부터 단일 광자를 광학적으로 분리할 수 있음을 나타낸다.

[0063] 기존 현미경에서 공간적으로 중첩된 두 개의 결함에 대해 $g^{(2)}(0)$ 값이 여전히 0.5 미만이라는 점도 주목할 필요가 있다. 두 개의 독립적이고 동일한 양자 광원의 방출은 $g^{(2)}(0)$~0.5를 가질 것으로 예상된다. 그러나 두 개의 결함이 있더라도 각 방출기의 밝기가 동일하지 않거나 측정이 두 개의 결함 사이에서 공간적으로 단측(one-sided)인 경우 0.5 미만의 g 값을 가질 수 있다. 게다가, 이러한 결함은 일시적으로 깜박이기 때문에 주어진 실험 조건에서 단일 및 두 개의 방출기가 혼합된 것처럼 동작한다. $g^{(2)}(0) < 0.5$가 단일 결함의 기준으로 자주 사용되나, 실제적으로, $g^{(2)}(0) < 0.5$ 만으로는 단일 양자 광원이라는 것을 나타낼 수 없음을 시사한다. 따라서 고해상도 이미징 시스템을 사용하면 단일 결함을 식별하고 밀접하게 배치된 결함을 독립적으로 조작하는 데 더 유리할 것이다.

[0064] 이어서, 미소 구체 보조 현미경은 스핀 판독 대비도(spin read-out contrast)를 개선하고 인접한 결함의 단일 스핀을 독립적으로 접근할 수 있음을 보여준다. 다이아몬드의 N_2 베이컨시 센터는 외부 자기장 없이 2.87GHz의 제로 필드 스플리팅(zero-field splitting)을 가지며, 이는 광학적으로 감지된 자기 공명(ODMR) 측정으로 감지할 수 있다.

[0065] 도 7(a) 및 도 7(b)는 기존 현미경과 미소 구체 보조 현미경에서 동일한 단일 결함의 ODMR 스펙트럼을 보여준다. 미소 구체 아래의 단일 결함은 25 ± 0.9%의 ODMR 대비도를 나타내며 기존 현미경의 15 ± 1.1%의 값보다 높다. 이러한 증가는 허상의 향상된 신호 대 잡음비에 기인하는 것으로 파악된다.

[0066] 기존 광학 회절 한계에서 병합된 결함의 단일 스핀을 분리할 수 있음을 증명하기 위해 두 현미경 설정을 사용하여 두 개의 밀접하게 배치된 결함의 ODMR 스펙트럼을 조사한다. 기존 현미경에서는 두 개의 결함이 공간적으로 중첩되지만 도 7(c)의 삽입도로 도시된 바와 같이 S=1의 축퇴를 깨뜨리는 무작위 방향의 자기장(~50G)을 적용하여 두 개의 서로 다른 스핀이 존재함을 확인할 수 있다.

[0067] 다이아몬드의 NV 중심은 결정에서 4가지 가능한 스핀 구성을 갖기 때문에 2개의 결함은 인가된 자기장에 따라 다른 양의 Zeeman 분할을 가질 수 있다. 도 7(c)로 도시된 바와 같이 ODMR 스펙트럼에서 2개의 결함에서 4개의 피크를 관찰할 수 있다. 각 결함은 2.87GHz의 중심에서 각각 δ_1 = 50MHz 및 δ_2 = 118MHz의 분할을 보인다. 기존 현미경에서 이러한 결함들은 병합되기 때문에 각 스핀을 광학적으로 제어할 수 없다.

[0068] 그러나 본 실시예에 의한 미소 구체 보조 공초점 현미경을 사용하면 도 7(d)에 삽입된 도면과 같이 이러한 결함이 명확하게 분리된다. 도 7(d) 및 도 7(e)로 예시된 것과 같이 각 결함의 ODMR 신호를 각각 기록한다. 분리되지 않은 2개 결함에 의한 이전의 4개 피크와 달리 각 ODMR 스펙트럼은 서로 다른 결함에 대한 간섭(crosstalk) 없이 각 결함에 의한 두 개의 분리된 피크(결합 1: δ_1= ±55MHz, 결함 2: δ_2= ±120MHz)만 표시한다. 두 설정 사이의 $\delta_{1,2}$의 차이는 측정 중 자석 정렬의 변화 때문이다. 따라서 향상된 공간 분해능 및 신호 대비를 갖춘 미세구 보조 이미징을 통해 기존 현미경에서 공간적으로 분리되지 않은 결함의 단일 광자와 단일 스핀의 독립적인 접근이 가능하다.

[0069] 미소 구체 렌즈는 재배치 가능한 광학 인터페이스로서 이점을 가진다. 미소 구체의 위치는 기계적 또는 광학적 힘에 의해 쉽게 제어될 수 있다. 미소 구체의 위치 제어를 위해 광학 트위저(optical tweezer, 400)을 결합하였다. 일반적으로 고굴절률 미소 구체는 계면에서의 산란력이 크기 때문에 광학 트위저을 사용하여 포획하기 어렵다. 그러나 침지 오일은 미소 구체와 환경 사이의 광학 지수 대비를 낮추어 반 데어발스의 힘 및 산란력을 극복할 수 있도록 한다. 도 6a 및 도 6b는 광학 트위저으로 개별 미소 구체의 포획 및 재배치를 도시한다. 트래핑 레이저 없이 미소 구체가 기판에 부착되어 있음을 주목하여야 하며, 구를 배치하면 며칠 후에도 제자리에 유지된다.

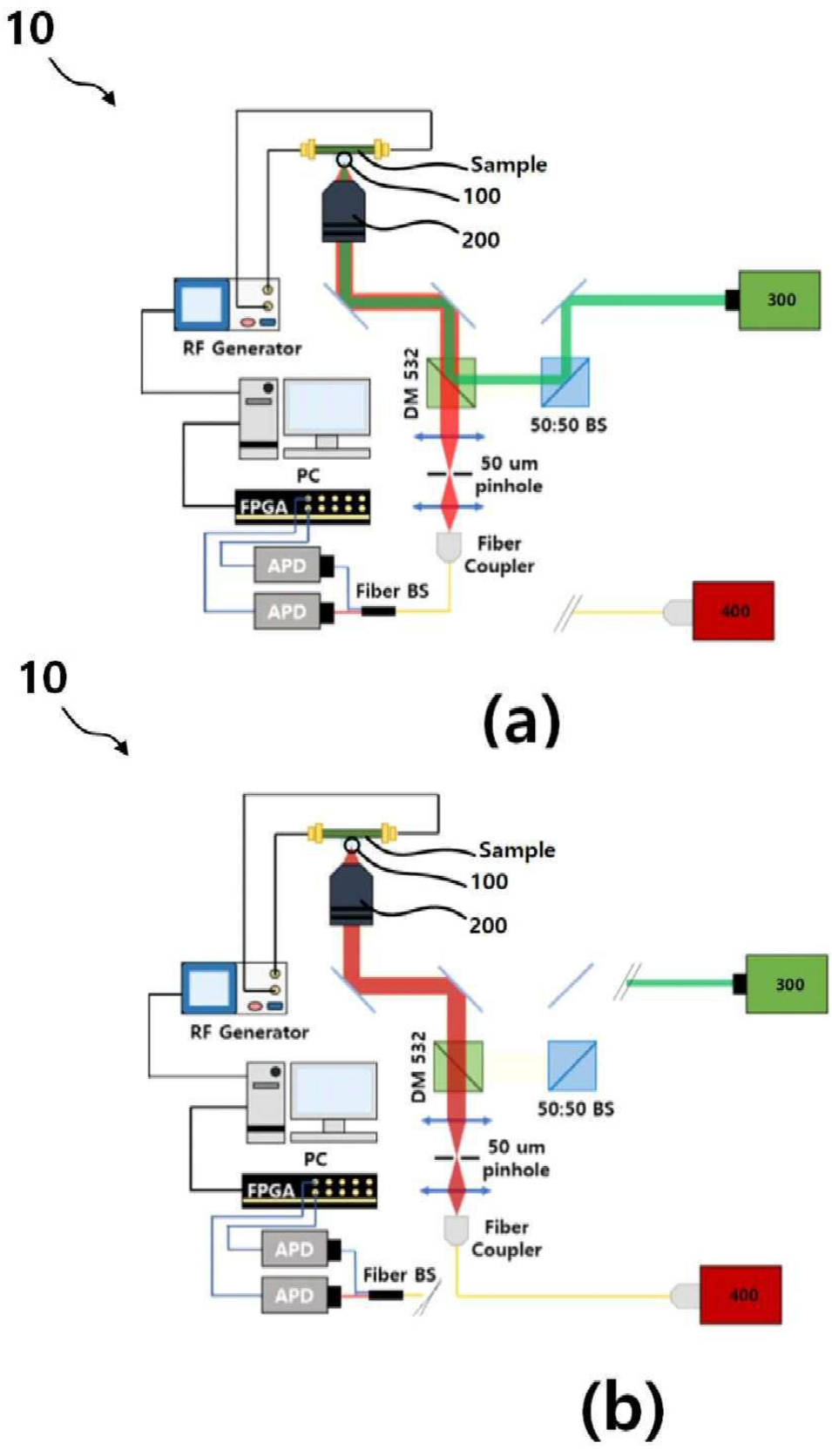
부호의 설명

[0070] 10: 이미징 장치 100: 미소 구체

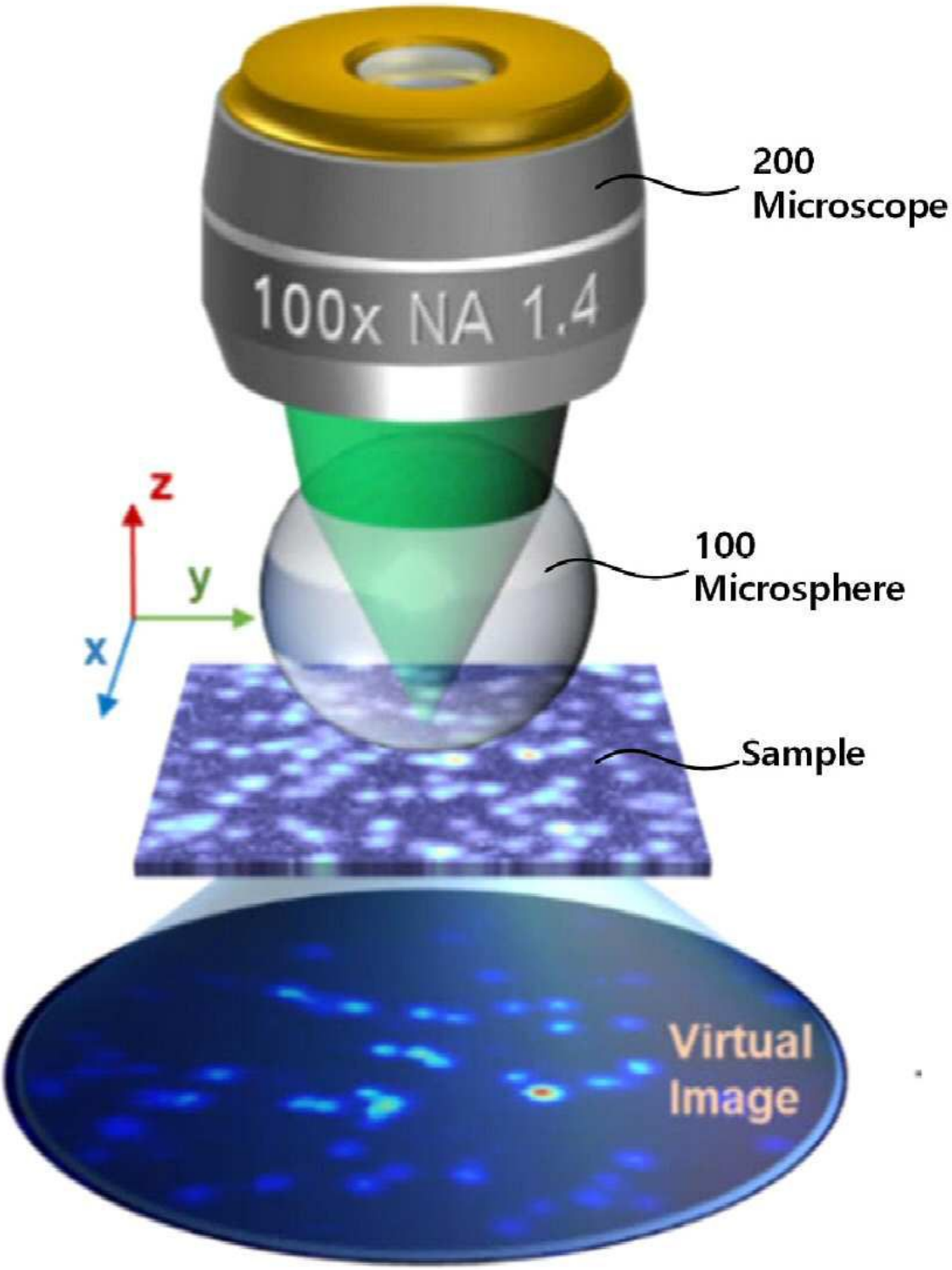
200: 광학계 300: 광원

도면

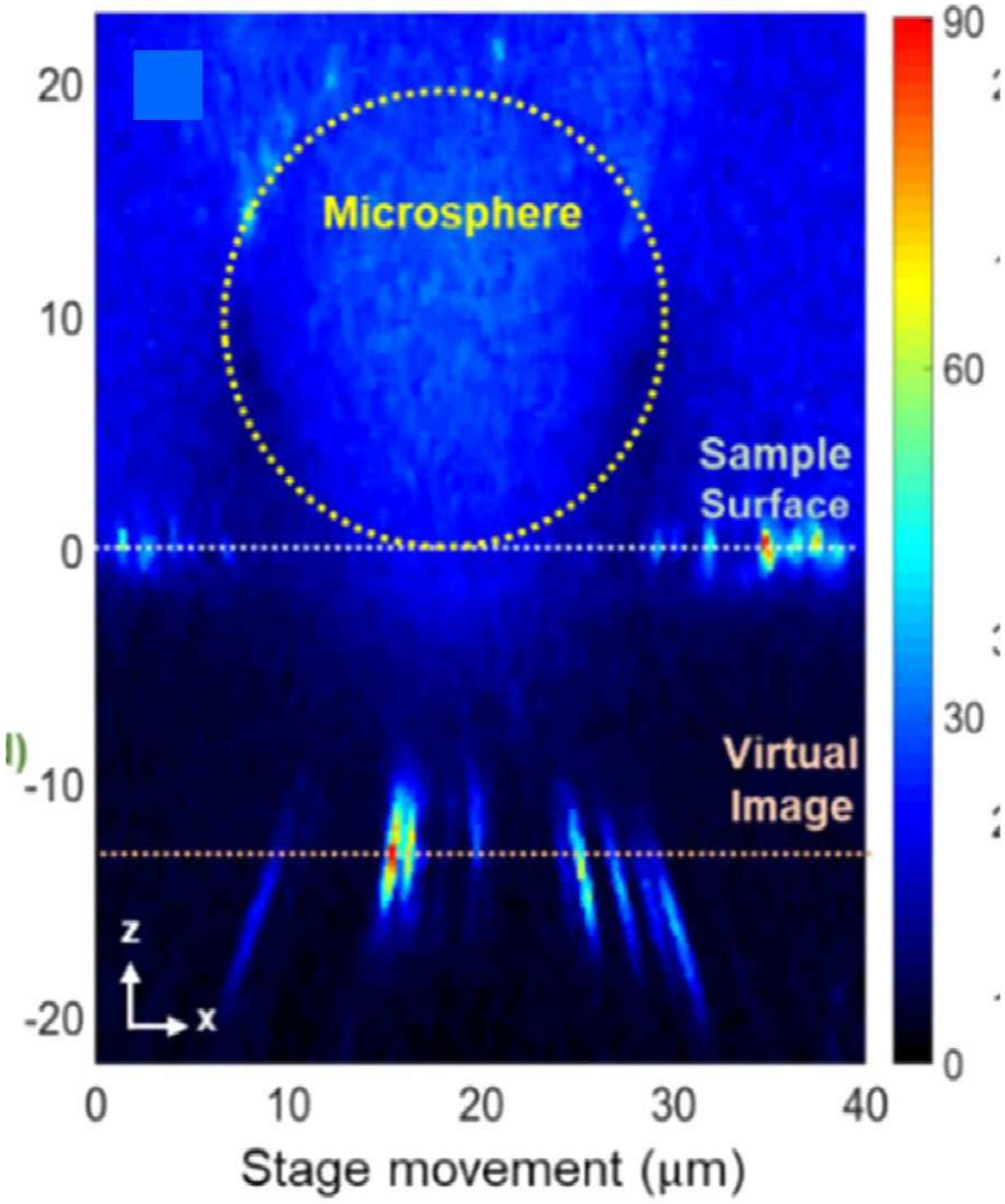
도면1


10
Sample
100
200
300
RF Generator
DM 532
50:50 BS
PC
50 um
pinhole
FPGA
Fiber
Coupler
APD
Fiber BS
APD
400
(a)
10
Sample
100
200
300
RF Generator
DM 532
50:50 BS
PC
50 um
pinhole
FPGA
Fiber
Coupler
APD
Fiber BS
APD
400
(b)

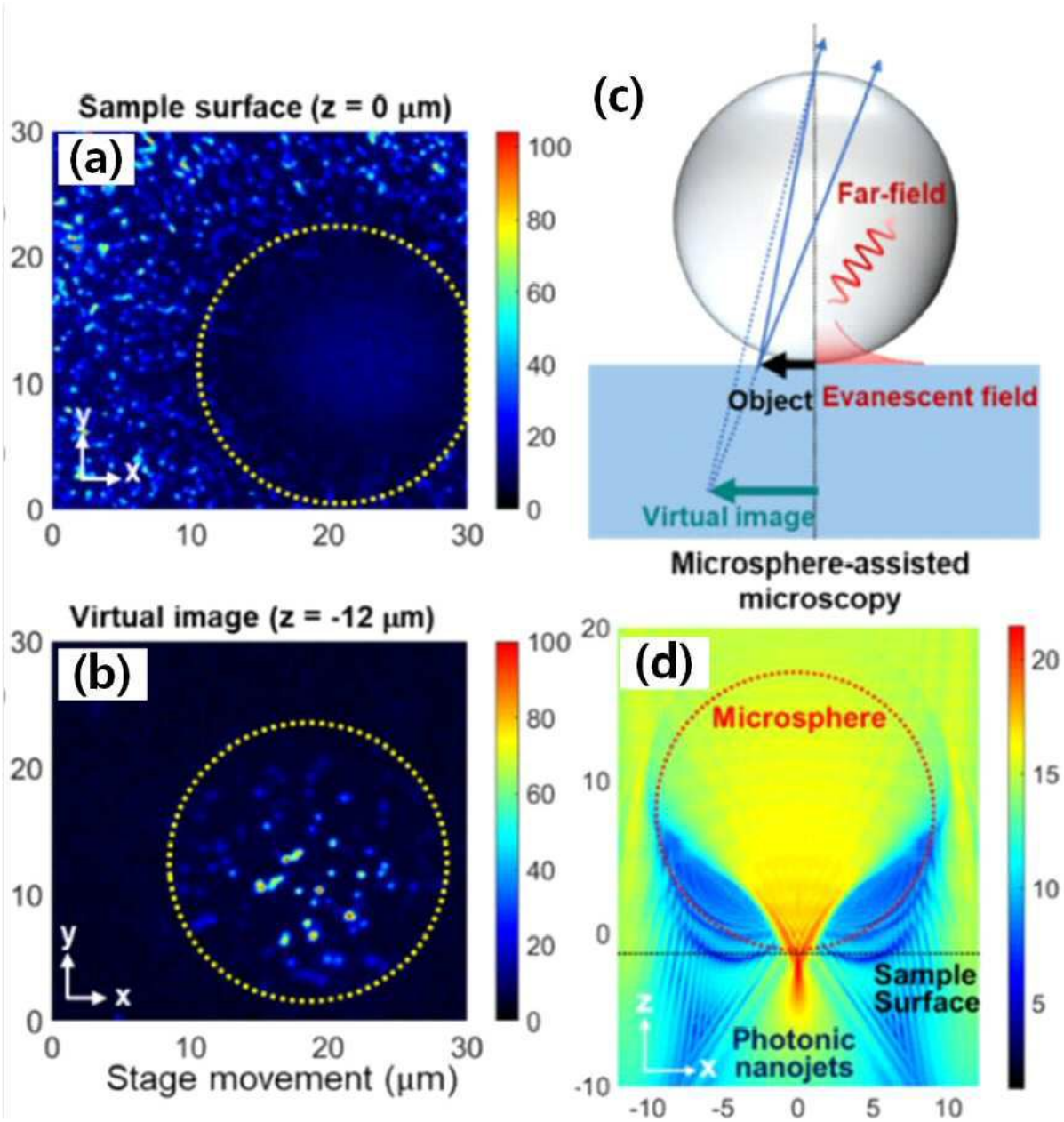
도면2


200
Microscope
100x NA 1.4
z
y
x
100
Microsphere
Sample
Virtual
Image

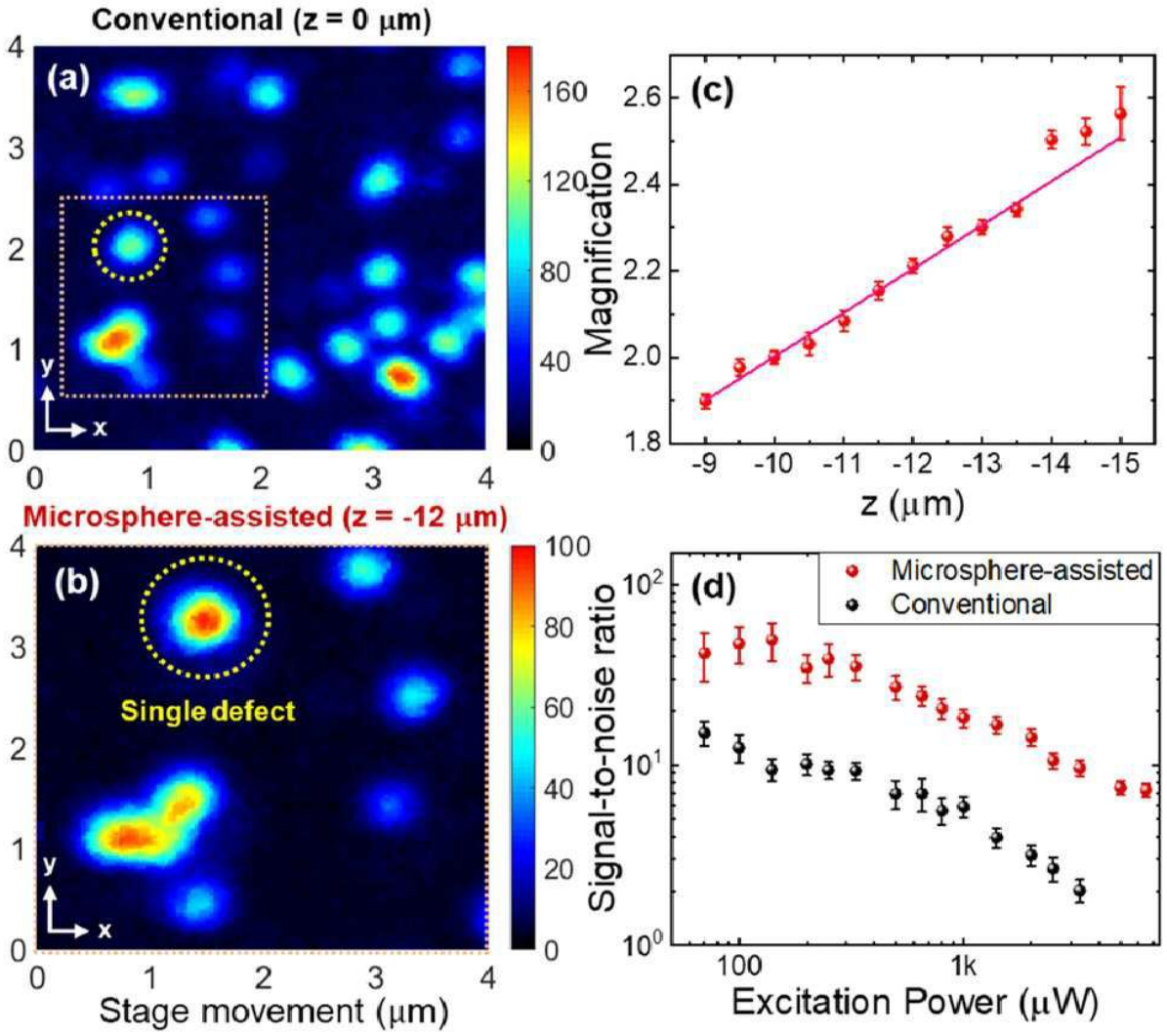
도면3


Microsphere
Sample Surface
Virtual Image
z
x
20
10
0
-10
-20
0
10
20
30
40
Stage movement (μm)
90
60
30
0

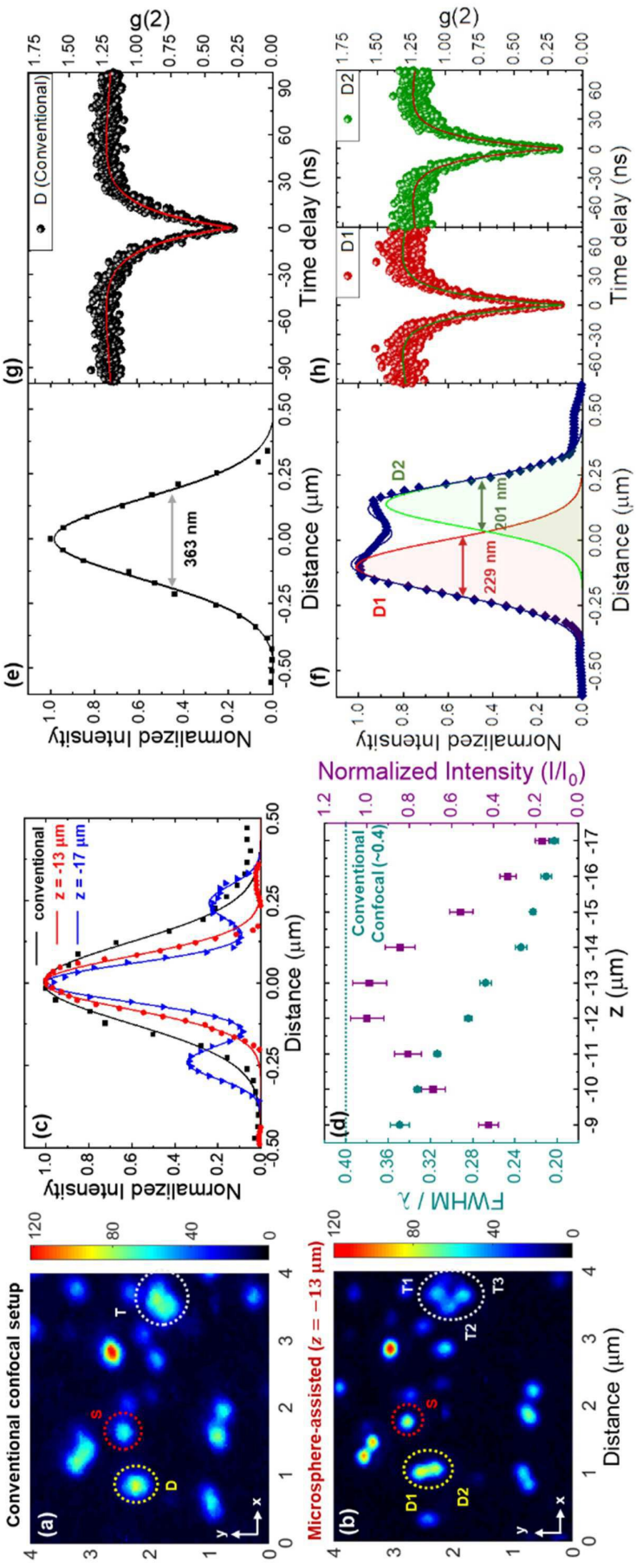
도면4


Sample surface (z = 0 μm)
(a)
Virtual image (z = -12 μm)
(b)
Stage movement (μm)
(c)
Far-field
Object
Evanescent field
Virtual image
Microsphere-assisted microscopy
(d)
Microsphere
Sample Surface
Photonic nanojets

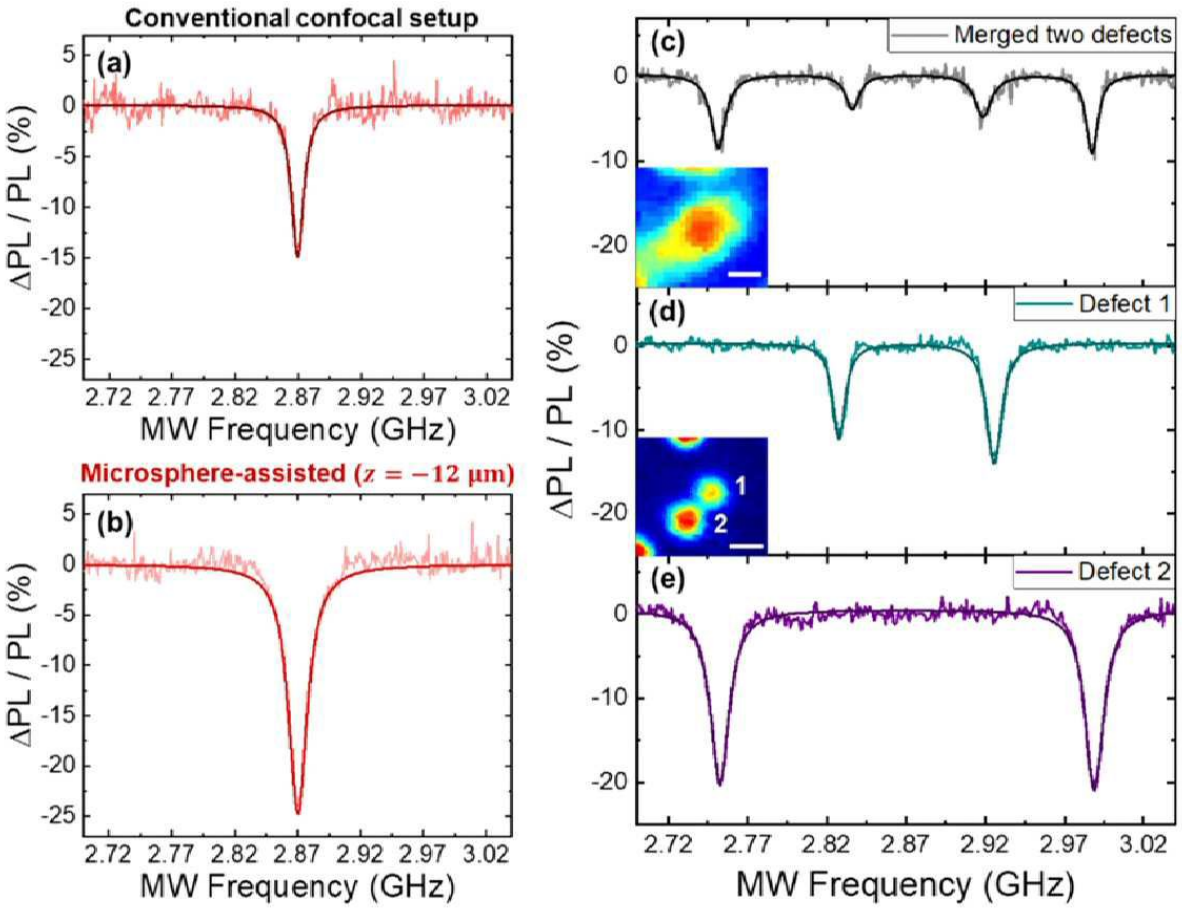
도면5


Conventional (z = 0 μm)
(a)
Microsphere-assisted (z = -12 μm)
(b)
Single defect
Stage movement (μm)
(c)
Magnification
z (μm)
(d)
Microsphere-assisted
Conventional
Signal-to-noise ratio
Excitation Power (μW)

도면6


Conventional confocal setup
Microsphere-assisted (z = −13 μm)
(a)
(b)
(c)
(d)
(e)
(f)
(g)
(h)
S
D
T
D1
D2
T1
T2
T3
conventional
z = -13 μm
z = -17 μm
Normalized Intensity
Distance (μm)
FWHM / λ
z (μm)
Conventional
Confocal (~0.4)
g(2)
Time delay (ns)
D (Conventional)
363 nm
229 nm
201 nm

도면7


Conventional confocal setup
(a)
ΔPL / PL (%)
MW Frequency (GHz)
Microsphere-assisted (z = −12 μm)
(b)
(c)
Merged two defects
(d)
Defect 1
(e)
Defect 2
1
2