



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2019-0106009
(43) 공개일자 2019년09월18일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

G01N 21/17 (2006.01)

(52) CPC특허분류

G01N 21/17 (2013.01)

G01N 2021/177 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2018-0026881

(22) 출원일자 2018년03월07일

심사청구일자 2018년03월07일

(71) 출원인

고려대학교 산학협력단

서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암동5가)

(72) 발명자

최원식

서울특별시 노원구 노원로1가길 10, 802동 1001호 (공릉동, 청솔8단지)

정승원

서울특별시 성북구 북악산로 828, 102동1502호(정릉동, 정릉스카이쌍용아파트)

이예령

서울특별시 송파구 잠실로 62, 308동203호(잠실동, 트리지움)

(74) 대리인

특허법인남춘

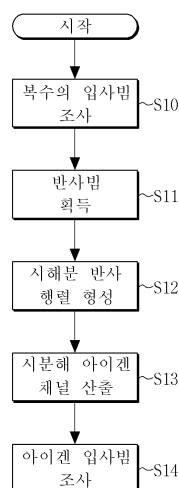
전체 청구항 수 : 총 4 항

(54) 발명의 명칭 산란 매질 내부의 타겟 오브젝트에 빛을 집속시키는 방법

(57) 요약

본 발명은 산란 매질 내부의 타겟 오브젝트에 빛을 집속시키는 방법에 관한 것으로, (a) 상호 상이한 입사 패턴을 갖는 복수의 입사빔이 조사되고, 각각의 상기 입사빔에 대해 상기 타겟 오브젝트로부터 반사되는 반사빔이 획득되는 단계와; (b) 복수의 상기 입사빔 및 상기 반사빔을 이용하여 시분해 반사 행렬이 형성되는 단계와; (c) 상기 시분해 반사 행렬이 특이값 분해(Singular value decomposition)에 적용되어 상기 타겟 오브젝트의 깊이에 대응하는 시분해 아이겐채널이 산출되는 단계와; (d) 상기 시분해 아이겐채널이 반영된 입사 패턴을 갖는 아이겐 입사빔이 상기 타겟 오브젝트에 조사되는 단계를 포함하는 것을 특징으로 한다. 이에 따라, 산란 매질 내부의 깊숙한 곳에 위치하는 타겟 오브젝트로 빛을 보다 효율적으로 집속시킬 수 있게 된다.

대표도 - 도2



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 R1612202

부처명 기초과학연구원

연구관리전문기관 기초과학연구원

연구사업명 외부연구단

연구과제명 [세부과제]분자 분광학 및 동력학 연구

기 여 율 1/1

주관기관 고려대학교산학협력단

연구기간 2017.01.01 ~ 2017.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

산란 매질 내부의 타겟 오브젝트에 빛을 집속시키는 방법에 있어서,

(a) 상호 상이한 입사 패턴을 갖는 복수의 입사빔이 조사되고, 각각의 상기 입사빔에 대해 상기 타겟 오브젝트로부터 반사되는 반사빔이 카메라에 도착하는 비행 시간 별로 획득되는 단계와;

(b) 복수의 상기 입사빔 및 상기 반사빔을 이용하여 시분해 반사 행렬이 형성되는 단계와;

(c) 상기 시분해 반사 행렬이 특이값 분해(Singular value decomposition)에 적용되어 상기 타겟 오브젝트의 깊이 대응하는 시분해 아이겐채널이 산출되는 단계와;

(d) 상기 시분해 아이겐채널이 반영된 입사 패턴을 갖는 아이겐 입사빔이 상기 타겟 오브젝트에 조사되는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 산란 매질 내부의 타겟 오브젝트에 빛을 집속시키는 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 (c) 단계에서 상기 특이값 분해는 수학식

$$R = U \Lambda V^{\dagger}$$

(여기서, R은 상기 시분해 반사 행렬이고, V는 상기 입사빔의 입사 평면에서 열이 아이겐채널을 포함하는 유니타리 행렬(Unitary matrix)이고, U는 상기 반사빔의 반사 평면에서 각 열에 아이겐채널을 포함하는 유니타리 행렬(Unitary matrix)이고, Λ 는 대각 성분으로 특이값(Singular value)을 갖는 대각 행렬이다)에 의해 수행되며;

상기 행렬 V의 열에 해당하는 아이겐채널을 이용하여 상기 시분해 아이겐채널이 산출되는 것을 특징으로 하는 산란 매질 내부의 타겟 오브젝트에 빛을 집속시키는 방법.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 (d) 단계에서는 상기 행렬 V의 열이 상기 입사 평면에서 2차원 복소 진폭 이미지로 변환되어 상기 아이겐 입사빔이 형성되는 것을 특징으로 하는 산란 매질 내부의 타겟 오브젝트에 빛을 집속시키는 방법.

청구항 4

제2항에 있어서,

상기 시분해 반사 행렬은 상기 입사빔의 상기 타겟 오브젝트까지의 비행 시간에 대해 산출되는 것을 특징으로 하는 산란 매질 내부의 타겟 오브젝트에 빛을 집속시키는 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 산란 매질 내부의 타겟 오브젝트에 빛을 집속시키는 방법에 관한 것으로서, 보다 상세하게는 산란 매질 내부의 깊은 곳에 위치하는 타겟 오브젝트로 빛을 보다 효율적으로 집속시킬 수 있는 산란 매질 내부의 타겟 오브젝트에 빛을 집속시키는 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 생의학 이미징(Biomedical imaging), 광학 요법(Phototherapy), 광유전학(Optogenetics)과 같은 매우 중요한

생체 내 응용 분야에서 타겟 오브젝트는 종종 무질서한 환경 내부에 위치한다. 이와 같은 분야에서, 효과적인 광학 이미징, 센싱, 광 시뮬레이션을 위해 산란 매질 내부 깊은 곳에 위치하는 타겟 오브젝트로 광파를 전달하는 것이 필요하다.

[0003] 그러나, 무질서한 환경에서 다중 광 산란에 의해 야기되는 랜덤 파 확산(Random wave diffusion)은 타겟 오브젝트로 빛이 도달하는 거리를 급격하게 제한한다. 파가 산란 매질 내부로 전파되면, 시간적, 그리고 공간적으로 확산되고, 투입된 에너지의 적은 양만이 타겟 오브젝트에 도달하게 된다.

[0004] 빛의 도달 거리를 늘리기 위한 간단한 해결책으로 투입되는 에너지를 증가시키는 방법이 있으나, 이는 백그라운드 노이즈를 증가시키고 타겟 오브젝트를 포함하는 샘플 전체에 원하지 않는 데미지를 줄 우려가 있다. 따라서, 광학 방법론에서의 유효 깊이를 향상시키기 위해서, 내부의 타겟 오브젝트로 전달되는 에너지 효율을 증가시키는 방법이 요구되고 있다.

[0005] 이전의 많은 연구에서 산란 매질을 통과하는 광파를 제어하였다. 이와 같은 연구의 기본적인 컨셉은 다중 산란 파의 간섭을 조정하기 위해 조사되는 광의 파면을 제어하는 것이다. Vellekoop 등의 논문 "Focusing coherent light through opaque strongly scattering media (Opt Lett 32, 2309-2311, doi:Doi 10.1364/Ol.32.002309, 2007)"에서는, 산란층을 투과하는 광파는 입사파의 파면 형성에 의해 포커싱된다는 사실을 확인하였다. 그 뒤에, 공간적 집속(Spatial focusing)에 더하여 시간적 집속(Temporal focusing)이 광대역의 광원을 이용하는 것에 의해 구현된다.

[0006] 한편, 적응 광학은 산란 매질 내부에서의 파 제어와 관련된 대표적인 접근 방법 중 하나이다. 적응 광학은 파면 형성 디바이스를 이용하여, 샘플-야기 위상 지연과 단일 산란 파를 보정한다. 그러나, 단일 산란 파는 다중 산란 파보다 약하기 때문에, 적응 광학은 깊은 곳에 위치하는 타겟 오브젝트에 대한 내부 파의 일부분만을 제어할 수 있다.

[0007] 광파의 시간 반전은 광파를 매질 내의 음향 포커스(Acoustic focus)로 집속(Focusing) 가능하게 하는 다른 방법이다. 그러나, 산란 매질을 투과하는 파를 이용하여 이를 증명하였으나, 생체 내 응용 분야에서의 효용성을 보증하기 위해서는, 후방 산란 파의 위상 공액(Phase-conjugation)을 이용하는 것이 필요하다.

[0008] 또한 산란 층 내에 위치하는 형광 물질로부터의 형광 신호를 증가시키기 위한 파면의 피드백 제어는 타겟 오브젝트로의 광 에너지 전달을 향상시키는 다른 접근 방법이지만, 이는 표지 물질을 필요로 하는 단점이 있다. 또한, 이 방법은 샘플 내에 존재하는 모든 형광 물질에 의해 영향을 받기 때문에, 타겟 오브젝트만의 신호를 취득하는데 한계가 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0009] 이에 본 발명은 상기와 같은 문제점을 해소하기 위해 안출된 것으로써, 산란 매질 내부의 깊은 곳에 위치하는 타겟 오브젝트로 빛을 보다 효율적으로 집속시킬 수 있는 산란 매질 내부의 타겟 오브젝트에 빛을 집속시키는 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.

과제의 해결 수단

[0010] 상기 목적은 본 발명에 따라, 산란 매질 내부의 타겟 오브젝트에 빛을 집속시키는 방법에 있어서, (a) 상호 상이한 입사 패턴을 갖는 복수의 입사빔이 조사되고, 각각의 상기 입사빔에 대해 상기 타겟 오브젝트로부터 반사되는 반사빔이 카메라에 도착하는 비행 시간 별로 획득되는 단계와; (b) 복수의 상기 입사빔 및 상기 반사빔을 이용하여 시분해 반사 행렬이 형성되는 단계와; (c) 상기 시분해 반사 행렬이 특이값 분해(Singular value decomposition)에 적용되어 상기 타겟 오브젝트의 깊이에 대응하는 시분해 아이겐채널이 산출되는 단계와; (d) 상기 시분해 아이겐채널이 반영된 입사 패턴을 갖는 아이겐 입사빔이 상기 타겟 오브젝트에 조사되는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 산란 매질 내부의 타겟 오브젝트에 빛을 집속시키는 방법에 의해서 달성된다.

[0011] 여기서, 상기 (c) 단계에서 상기 특이값 분해는 수식식 $R = U\Lambda V^\dagger$ (여기서, R은 상기 시분해 반사 행렬이고, V는 상기 입사빔의 입사 평면에서 열이 아이겐채널을 포함하는 유니타리 행렬(Unitary matrix)이고, U는 상기 반사빔의 반사 평면에서 각 열에 아이겐채널을 포함하는 유니타리 행렬(Unitary matrix)이고, Λ 는 대각 성분으로 특이값(Singular value)을 갖는 대각 행렬이다)에 의해 수행되며; 상기 행렬 V의 열에 해당하는

아이겐채널을 이용하여 상기 시분해 아이겐채널이 산출될 수 있다.

[0012] 그리고, 상기 (d) 단계에서는 상기 행렬 V 의 열이 상기 입사 평면에서 2차원 복소 진폭 이미지로 변환되어 상기 아이겐 입사빔이 형성될 수 있다.

[0013] 또한, 상기 시분해 반사 행렬은 상기 입사빔의 상기 타겟 오브젝트까지의 홀 센서 시간에 대해 산출될 수 있다.

발명의 효과

[0014] 상기 구성에 따라 본 발명에 따르면, 산란 매질 내부의 깊은 곳에 위치하는 타겟 오브젝트로 빛을 보다 효율적으로 집속시킬 수 있는 산란 매질 내부의 타겟 오브젝트에 빛을 집속시키는 방법이 제공된다.

도면의 간단한 설명

[0015] 도 1은 본 발명에 따른 산란 매질 내부의 타겟 오브젝트에 빛을 집속시키는 방법에서 시분해 아이겐채널을 산출하기 위한 실험 셋업 개요도이고,

도 2는 본 발명에 따른 산란 매질 내부의 타겟 오브젝트에 빛을 집속시키는 방법을 설명하기 위한 도면이고,

도 3a 내지 도 3c는 본 발명에 따른 산란 매질 내부의 타겟 오브젝트에 빛을 집속시키는 방법에서 입사빔, 진폭 지도 및 시분해 반사행렬의 예를 나타낸 도면이고,

도 4a 내지 도 4g는 본 발명에 따른 산란 매질 내부의 타겟 오브젝트에 빛을 집속시키는 방법의 실험 예를 설명하기 위한 도면이고,

도 5a 내지 도 5f는 본 발명에 따른 산란 매질 내부의 타겟 오브젝트에 빛을 집속시키는 방법의 다른 실험 예를 설명하기 위한 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0016] 이하에서는 첨부된 도면들을 참조하여 본 발명에 따른 실시예에 대해 상세히 설명한다.

[0017] 도 1은 본 발명에 따른 산란 매질 내부의 타겟 오브젝트에 빛을 집속시키는 방법에서 시분해 아이겐채널을 산출하기 위한 실험 셋업 개요도이다. 도 1을 참조하여 설명하면, 중심 파장 780 nm, 대역폭이 25 nm인 Ti-Sapphire 펄스 레이저(TL)와 Mach-Zhender 간섭계를 이용한 간섭 현미경 시스템이 적용되는 것을 예로 한다.

[0018] 레이저(TL)에서 나온 광은 광 분할기(BS1)에서 샘플빔(Sample beam)과 기준빔(Reference beam)으로 분할되어 진행된다. 샘플빔의 빔 경로에는 공간 광 변조기(SLM : Spatial light modulator)가 배치되어 샘플에 입사하는 광의 입사 패턴, 즉 입사각을 조절한다. 공간 광 변조기(SLM)를 거친 샘플빔은 광 분할기(BS1, BS2)를 투과한 후, 대물렌즈(OL1)를 거쳐 샘플로 입사된다. 그리고, 샘플 내의 산란 매질을 거쳐 타겟 오브젝트로부터 반사된 샘플빔은 광 분할기(BS2, BS3)를 거쳐 카메라(C1)에 입사된다. 여기서, 샘플로부터 반사된 샘플빔은 광 분할기(BS3)를 거치면서 기준빔과 결합되어 카메라(C1)에 의해 촬영되는데, 기준빔과의 간섭을 통해 간섭 무늬를 형성하게 된다.

[0019] 이와 같은 과정에서, 기준빔의 경로에 회절 격자(DG)를 배치하고, 회절 격자(DG)에 의해 회절된 기준빔만을 걸러내어 샘플에서 반사된 샘플빔과 탈축 홀로그램을 형성하도록 셋팅된다. 또한, 기준빔의 광 경로 상에 스캔 거울(SM)을 배치하고, 기준빔의 광 경로의 길이를 조절함으로써, 타겟 오브젝트의 깊이에 대응하는 기준빔의 광 경로의 길이를 결정함으로써, 후술할 시분해 반사 행렬을 획득 가능하게 된다.

[0020] 또한, 본 발명에서는 후술할 시분해 반사 아이겐채널의 광 에너지 전달 효율을 검증하기 위해 샘플을 투과한 광을 별도의 카메라(C2)를 통해 측정하여 입사빔의 투과 세기를 측정하도록 하였으며, 샘플을 투과한 광은 대물렌즈(OL2)를 거쳐 카메라(C2)에 의해 촬영된다.

[0021] 도 1의 미설명 참조번호 M1, M2, M3, M4는 샘플빔과 기준빔의 광 경로를 전환하기 위한 미러이고, L1, L2, L3, L4, L5, L6는 광 경로 상에 배치되는 렌즈로, 도 1에 도시된 셋업 구성은 일 예로서, Mach-Zhender 간섭계를 구성하는데 있어 그 배치가 변경 가능함은 물론이다.

[0022] 도 2는 본 발명에 따른 산란 매질 내부의 타겟 오브젝트에 빛을 집속시키는 방법을 설명하기 위한 도면으로, 도 1에 도시된 실험 셋업을 이용하여 구현하는 것을 예로 한다.

[0023] 먼저, 입사빔의 입사각을 가변시켜 상호 상이한 입사 패턴을 갖는 복수의 입사빔을, 예를 들어 n 회의 입사빔을

순차적으로 샘플에 조사한다(S10). 여기서, 샘플은 산란 매질 내부의 깊은 곳에 타겟 오브젝트가 위치하는 형태를 갖는다. 본 발명에서는 상술한 바와 같이, 공간 광 변조기를 이용하여 복수의 입사각으로 구성된 입사 패턴을 갖는 입사빔을 n 회, 예를 들어 1,600회의 입사빔을 조사하는 것을 예로 한다.

[0024] 그런 다음, 각각의 입사빔에 대해 샘플의 타겟 오브젝트로부터 반사되는 반사빔을 카메라를 통해 획득하게 되는 데(S11), 상기와 같이 1,600 장의 간섭 이미지의 획득이 가능하게 된다. 여기서, 타겟 오브젝트로부터 반사되는 반사빔은 카메라에 도착하는 비행 시간 별로 획득된다.

[0025] 도 3a는 서로 다른 입사 패턴을 갖는 입사빔의 예를 나타낸 도면이다. 여기서, 샘플빔과 기준빔의 경로차가 가 간섭 거리 이내에 있을 경우에만 간섭 패턴이 만들어지고, 간섭 패턴의 푸리에 변환을 통해 간섭 성분만을 걸러 내어 반사빔의 복소 이미지를 얻어낼 수 있다.

[0026] 상기와 같이 복수의 반사빔을 통해 복소 이미지가 획득되면, 입사빔과 반사빔을 이용하여 시분해 반사 행렬을 형성한다(S12). 여기서, 시분해 반사 행렬은 입사빔의 타겟 오브젝트까지의 비행 시간에 대해 산출된다.

[0027] 보다 구체적으로 설명하면, 도 1에 도시된 실험 셋업에서 공간 광 모듈레이터(SLM)에서 다양한 방향과 기울기의 선형 위상 경사의 기록에 의해 입사빔의 입사파 $\vec{k}^i = (k_x^i, k_y^i)$ 의 횡파 벡터(Transverse wave vector)가 스캔된다. 여기서, 각도 스캐닝 범위(Angular scanning range)는 0.4의 개구수(numerical aperture)까지 걸쳐있으며, 입사파 벡터의 수는 $40 \times 40 \mu m^2$ 의 시야를 예로 할 때 직교 자유 모드(Orthogonal free mode)를 커버하기 위해 상술한 바와 같이 1,600개 이다.

[0028] 도 3b는 각각의 $\vec{k}^i$ 에 대해 얻어진 후방 산란 파 $E_o(\vec{r}_o; \vec{k}^i, \tau_0)$ 의 대표적인 진폭 지도의 예를 나타낸 도면이다. 여기서, 대물 초점은 타겟 오브젝트의 깊이로 설정되고, $\vec{r}_o = (x, y)$ 는 타겟 오브젝트가 위치하는 타겟 평면에서의 공간 좌표에 대응하게 된다. 도 3a에 도시된 바와 같이, 공간 광 변조기(SLM) 상에 기록된 위상 경사의 복소장 지도 $E_o(\vec{r}_o; \vec{k}^i, \tau_0)$ 가 입력 기저(Input basis)로 사용된다. 그리고, 조사의 초점이 수집되는 포커스와 매칭되기 때문에 $\vec{r}_i = (x, y)$ 는 $\vec{r}_o$ 와 동일하게 된다.

[0029] 본 발명에 따른 시분해 반사 행렬은 $R(\vec{r}_o; \vec{r}_i, \tau_0)$ 로 표현되는데, 위치 $\vec{r}_i$ 에서 단위 진폭 입사파(Unit-amplitude incidence wave)의 조사에 대해 검출 포인트 $\vec{r}_o$ 와 특정 비행 시간 τ_0 에서의 복소 진폭을 그 요소로 한다. 이를 위해, 도 3b에 도시된 측정 이미지의 세트, 즉 진폭 지도가 반사 행렬 $M_o(\vec{r}_o; \vec{k}^i, \tau_0)$ 을 형성하기 위해 변형되는데, 각각의 이미지가 반사 행렬의 열로 전환되어 형성된다.

[0030] 마찬가지로, 입사 행렬 $M_i(\vec{r}_i; \vec{k}^i, \tau_0)$ 가, 도 3a에 도시된 입력 기저로부터 구성된다. 그런 다음, 시분해 반사 행렬이 반사 행렬과 입사 행렬의 행렬곱 $R(\vec{r}_o; \vec{r}_i, \tau_0) = M_o(\vec{r}_o; \vec{k}^i, \tau_0)M_i(\vec{r}_i; \vec{k}^i, \tau_0)^{-1}$ 에 의해 산출되어, 도 3c에 도시된 바와 같은 진폭 지도로 표현되는 시분해 반사 행렬이 산출된다.

[0031] 상기와 같이, 시분해 반사 행렬이 산출되면, 시분해 반사 행렬을 이용하여 시분해 아이겐채널을 산출한다(S13). 본 발명에서는 시분해 반사 행렬이 특이값 분해(Singular value decomposition)에 적용되어 타겟 오브젝트의 깊이 이에 대응하는 시분해 아이겐채널이 산출되는 것을 예로 한다. 여기서, 특이값 분해는 [수학식 1]과 같이 표현될 수 있다.

[0032] [수학식 1]

$$R = U \Lambda V^\dagger$$

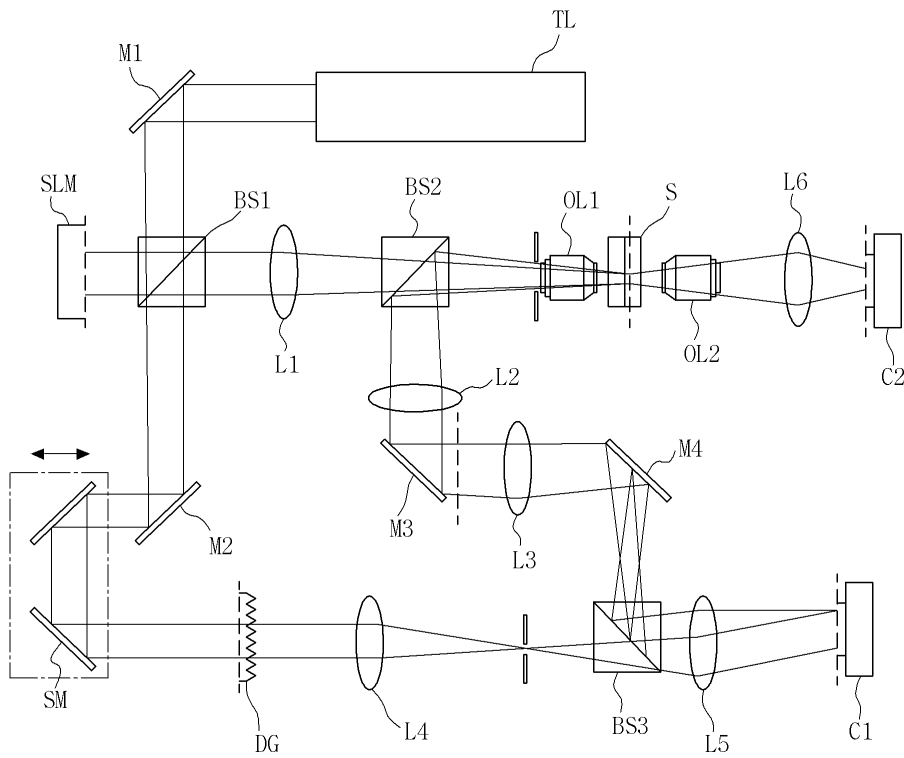
[0034] 여기서, R은 시분해 반사 행렬이고, V는 입사빔의 입사 평면에서 열이 아이겐채널을 포함하는 유니타리 행렬(Unitary matrix)이고, U는 반사빔의 반사 평면에서 각 열에 아이겐채널을 포함하는 유니타리 행렬(Unitary matrix)이고, Λ 는 대각 성분으로 특이값(Singular value)을 갖는 대각 행렬이다.

- [0035] 각각의 특이값과 그 제곱값, 또는 고유값(Eigenvalue)은 각각 관련된 시분해 아이겐채널에 대해 진폭 및 세기의 반사율에 대응한다. 여기서, 특이값 제곱인 파란색 점선은 랜덤 입력과의 반사율에 의해 일반화된다.
- [0036] 상기와 같은 시분해 아이겐채널이 산출되면, 시분해 아이겐채널이 반영된 입사 패턴을 갖는 입사빔(이하, '아이겐 입사빔'이라 함)이 샘플 내의 타겟 오브젝트로 조사되면(S14), 샘플 내로 입사되는 아이겐 입사빔이 샘플 내의 타겟 오브젝트로 포커싱 가능하게 된다.
- [0037] 본 발명에서는 시분해 아이겐채널을 입사빔에 반영하여 아이겐 입사빔을 형성하기 위해, [수학식 1]의 행렬 V 의 열로부터 확인된 입사파를 형성한다. 예를 들어, 행렬 V 의 j^{th} 열을 $\vec{r}_i$ 평면에 2차원의 복소 진폭(2-dimensional complex amplitude)으로 변환하는데, 이는 특이값 σ_j 를 갖는 j^{th} 아이겐채널이 된다. 본 발명에서는 도 1에 도시된 셋업에 적용된 공간 광 변조기(SLM)가 입사파의 위상을 제어함으로써, 아이겐채널이 입사빔에 반영되는 것을 예로 한다.
- [0038] 이하에서는 본 발명에 따른 산란 매질 내부의 타겟 오브젝트에 빛을 집속시키는 방법의 실험 결과에 대해 설명한다. 도 4a는 본 발명에 따른 산란 매질 내부의 타겟 오브젝트에 빛을 집속시키는 방법의 효과를 실험하기 위한 테스트 샘플이다.
- [0039] 도 4a에 도시된 테스트 샘플은 $1\mu\text{m}$ 두께로 PMMA(Poly methyl methacrylate) 재질의 투명 시트가 코팅된 $10\mu\text{m}$ 의 직경을 갖는 실버 디스크가 타겟 오브젝트(TO)로 제작되었다. 도 4b는 자유 공간에 노출시킨 타겟 오브젝트의 반사 이미지이다.
- [0040] 실버 디스크의 두께는 30nm 이고, 이는 디스크의 뒤에서 측정된 투과율이 62.6% 일 정도로 충분히 얇다. 실버 디스크의 투과율은 상기와 같이 이미 알고 있으므로, 도 1에 도시된 셋업에서 설명하였듯이, 투과 측정으로부터 타겟 오브젝트에서의 광 세기를 직접 측정할 수 있다.
- [0041] 타겟 오브젝트의 상부에는 폴리디메틸실록산(Polydimethylsiloxane) 내에 $1\mu\text{m}$ 직경의 폴리스티렌(Polystyrene) 비드를 랜덤하게 분포시켜 산란 층을 형성한다. 이와 같은 산란 층의 산란 파라미터는 780nm 의 파장에서 $l_s = 48.55\mu\text{m}$ 와, $l_t = 190\mu\text{m}$ 이다. 산란 층의 두께, 즉 타겟 오브젝트의 깊이 z_s 는 $1.9l_s$ 에서 $6.8l_s$ 사이이다. 타겟 오브젝트의 상부의 산란 층과 유사한 산란 파라미터를 갖는 다른 산란 층이 타겟 오브젝트의 하부에 위치하여 산란 매질의 가운데에 실버 디스크가 위치하는 형태로 구성하였다. 본 발명에서는 산란 매질의 표면으로부터 타겟 오브젝트까지의 거리 즉, 깊이 $z_s = 331.7\mu\text{m}(6.84l_s, 1.75l_s)$ 에 타겟 오브젝트인 실버 디스크를 배치한다.
- [0042] 시분해 반사 측정은 저결맞음 간섭계(Low-coherence interferometry)를 이용하여 진행된다. 랜덤 위상 패턴을 샘플에 조사하는 Ti:Sa 레이저(중심 파장: 780nm , 펄스폭 : 52fs)로부터의 출력 빔의 파면에 기록되고, 후방 산란 파의 토탈 세기는 도 4c에 도시된 바와 같이 비행 시간의 함수로 측정된다.
- [0043] 오브젝트 렌즈의 수침(Immersion water)과 산란 매질 간의 지수 불일치로 인해, 후방 산란 파 세기의 최대 피크가 산란 매질의 표면에 대응하는 깊이에서 나타났다. 본 발명에서는 산란 매질의 표면으로부터의 반사를 기준점(Reference point)로 설정하고, 기준 점에서의 비행 시간을 '0'으로 설정한다.
- [0044] 기준 점에서의 피크의 폭은 $7.8\mu\text{m}$ 로 측정되었고, 이는 광원의 펄스폭에 의해 결정되는 본 발명에 따른 이미징 시스템의 시분해 폭과 동일하다. 검은색 화살표가 지시하는 작은 피크는 $\tau_0 = 3.1\text{ps}$ 에서 나타났으며, 이는 실버 디스크로부터 비롯되는 후방 산란 파에 대응한다.
- [0045] 다른 비행 시간에 도달하는 충분한 양의 후방 산란 신호가 존재하며, 인테그랄(Integral)은 τ_0 에서 신호보다 86배이다. 이와 같은 이유로 타겟 오브젝트는 모든 비행 시간에서 발생하는 후방 산란이 모두 합쳐지는 정상상태 반사 이미징에서는 보이지 않는다. 검출기로 돌아오는 경로에서 후방 산란 파가 퍼지기 때문에, 타겟 오브젝트는 도 4d에 도시된 바와 같이 τ_0 에서 분해(gated)된 각 합성 이미지(Angular compounding imaging)에서도 보이지 않는다.

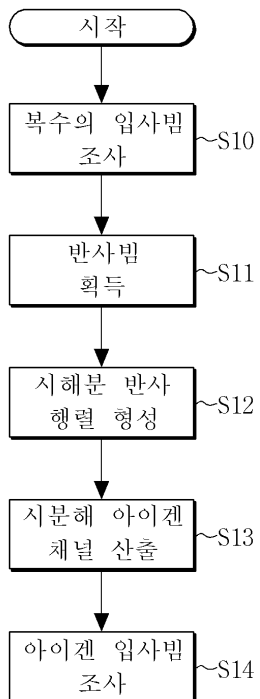
- [0046] 도 4a에 도시된 테스트 샘플(TS)에 대해 상술한 바와 같이, 시분해 반사 행렬을 측정하고, 이를 이용하여 시분해 아이겐채널을 산출하여 아이겐 반사빔을 테스트 샘플에 조사하는 실험을 수행한다.
- [0047] 도 4e는 후방 산란 파의 시간 응답을 나타낸 그래프로, 도 4e의 파란색 선은 도 4c에 도시된 바와 같은 랜덤 패턴 입력에 대한 시간 응답이고, 붉은색 선이 아이겐채널이 반영된 입력, 즉 아이겐 입사빔에 대한 시간 응답이다. 그리고 녹색 선은 정상상태 아이겐채널에 대한 시간 응답이다. 도 4e에 도시된 바와 같이, 다른 비행 시간에서의 세기는 거의 유사하지만, 타겟 비행 시간 $\tau_0 = 3.1\text{ps}$ 에서는 랜덤 패턴 입력에 비해 3.8배 정도 증가했음을 확인하였고, 이는 아이겐 입사빔이 타겟 오브젝트로 집속되는 효과가 있음을 의미한다.
- [0048] 또한, 도 1에 도시된 카메라(C2)를 통해 타겟 오브젝트를 투과한 광의 세기를 측정하였으며, 도 4f 및 도 4g에 도시된 바와 같이, 아이겐채널이 반영되었을 때 타겟에 아이겐 입사빔이 집속되는 효과가 있음을 증명하였다. 도 4f는 랜덤 패턴 입력을 조사하고 투과 이미지를 촬영한 사진이고, 도 4g는 본 발명에 따른 아이겐 입사빔을 조사하여 투과 이미지를 촬영한 사진이다.
- [0049] 한편, 본 발명에서는 생체 조직 내에 위치하는 타겟 오브젝트로 빛이 집속되는지 여부를 실험하였다. 도 5a에 도시된 바와 같이, 3일된 스프라그 돌리(Sprague Dawley) 쥐로부터 얻은 두개골(SK) 아래에 타겟 오브젝트를 위치시키고 실험을 수행했다. 두개골(SK)의 두께는 대략 $340\mu\text{m}$ 이다.
- [0050] 본 실험에서는 2 종류의 타겟이 준비된다. 하나는 도 4a에서 설명한 특성을 갖는 $10\mu\text{m}$ 직경의 실버 디스크(이하, '타겟 1'이라 함)이다. 다른 하나는 10개의 분산된 $3\mu\text{m}$ 직경의 실버 디스크(이하, '타겟 2'라 함)로 모두 30nm 두께이다. 두개골(SK)의 구조적인 비균질성으로 인해, 도 5b에 도시된 바와 같이, 일반적으로 인공적인 산란 샘플보다 두개골(SK)이 좀 더 복잡한 후방 산란 파의 시간적 응답을 보여준다. 후방 산란 파의 세기는 랜덤 입력과 비교할 때, 타겟 비행 시간 $\tau_0 = 3.2\text{ps}$ 에서 33.6배로 증가하였다.
- [0051] 도 5c는 타겟 1에 랜덤 입력을 조사하고 전송파의 이미지를 기록한 것이고, 도 5d는 타겟 2에 랜덤 입력을 조사하고 전송파의 이미지를 기록한 것이다. 그리고, 도 5e는 타겟 1에 시분해 아이겐채널이 반영된 아이겐 입사빔을 조사하고 전송파의 이미지를 기록한 것이고, 도 5f는 타겟 2에 시분해 아이겐채널이 반영된 아이겐 입사빔을 조사하고 전송파의 이미지를 기록한 것이다.
- [0052] 타겟 1에 대해 랜덤 입력과 비교할 때, 타겟 오브젝트의 최대 에너지 전달 향상은 12.4였다. 이와 같은 결과는 본 발명이 광학 이미징과 신경계 자극에 있어 한계였던 두개골을 통해서도 충분한 에너지 집속이 가능하다는 점을 확인할 수 있다.
- [0053] 이상에서 본 발명의 바람직한 실시예에 대하여 상세하게 설명하였지만 본 발명의 권리범위는 이에 한정되는 것은 아니고 다음의 청구범위에서 정의하고 있는 본 발명의 기본 개념을 이용한 당업자의 여러 변형 및 개량 형태 또한 본 발명의 권리범위에 속하는 것이다.

도면

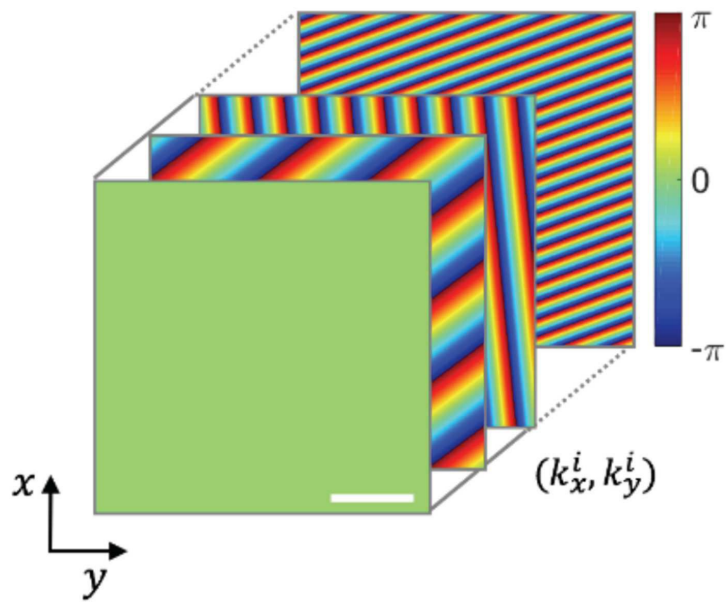
도면1



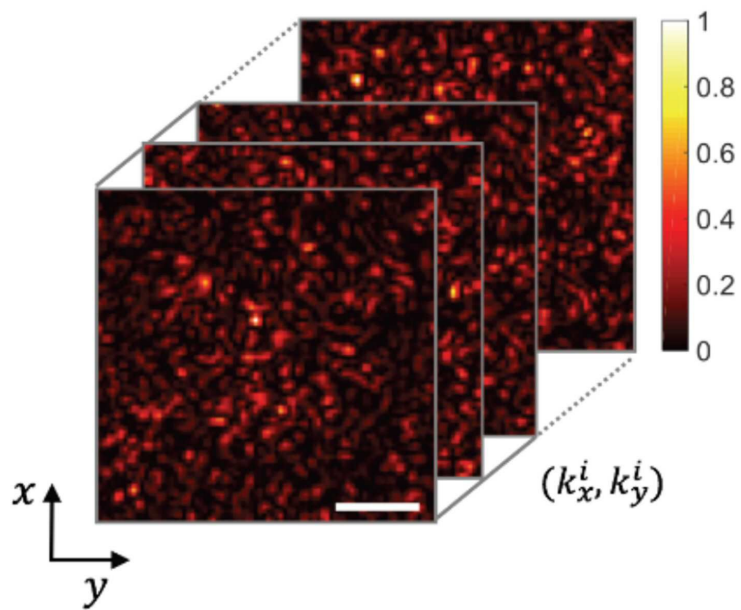
도면2



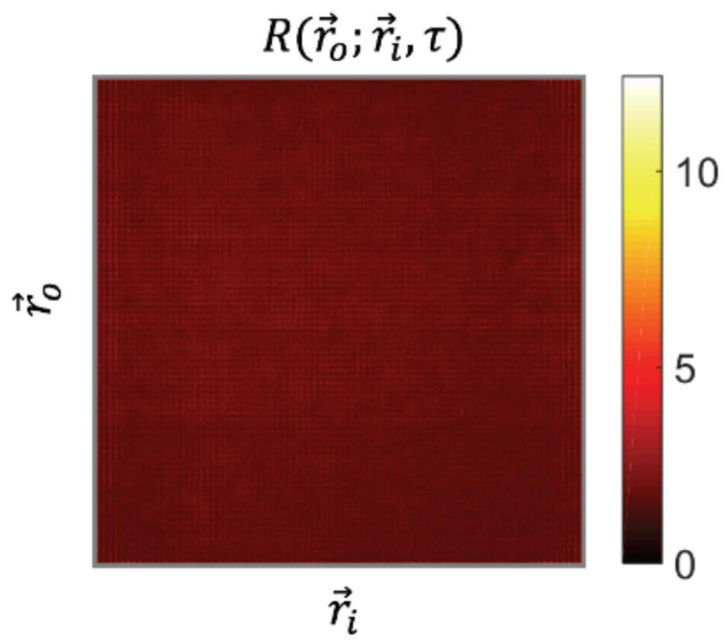
도면3a



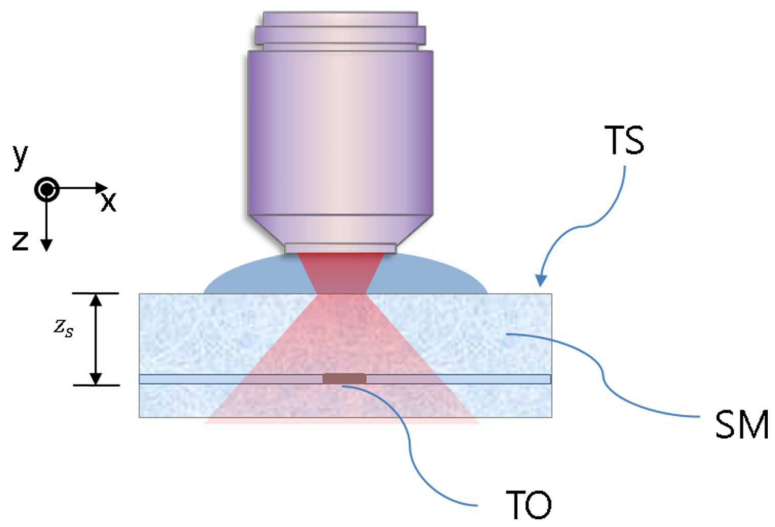
도면3b



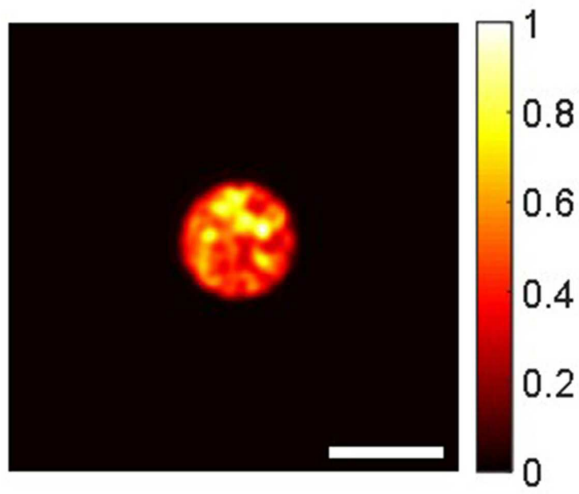
도면3c



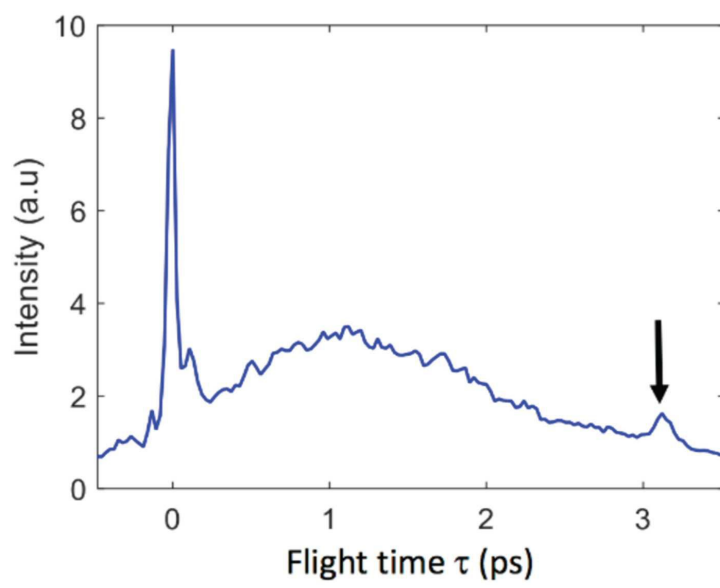
도면4a



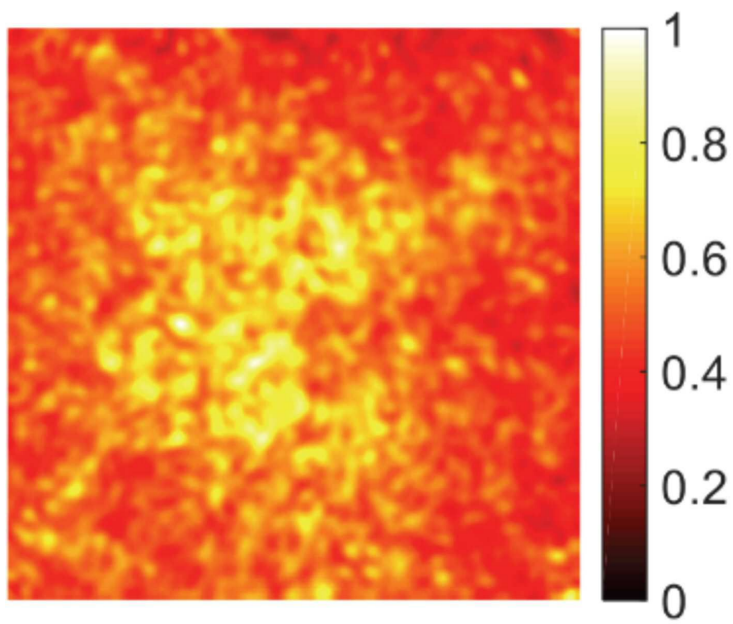
도면4b



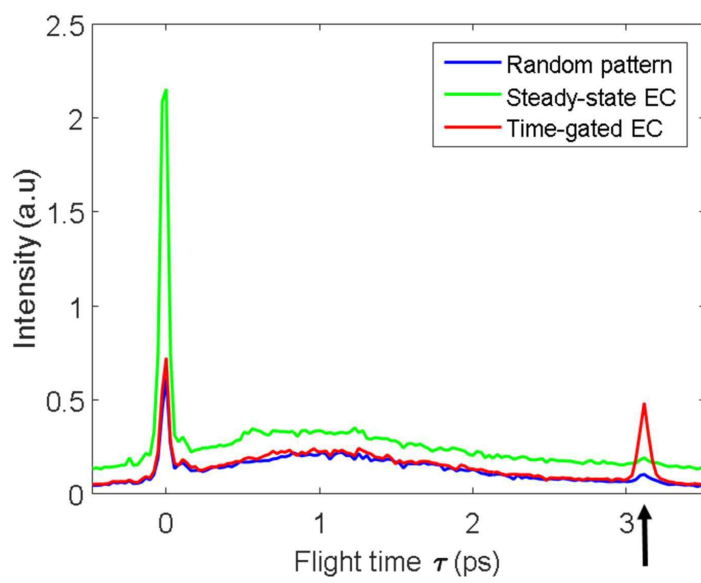
도면4c



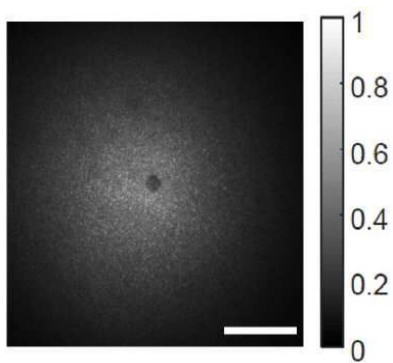
도면4d



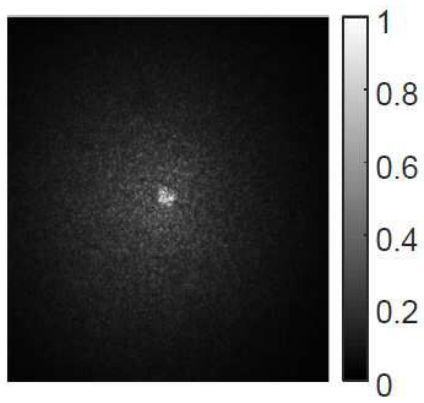
도면4e



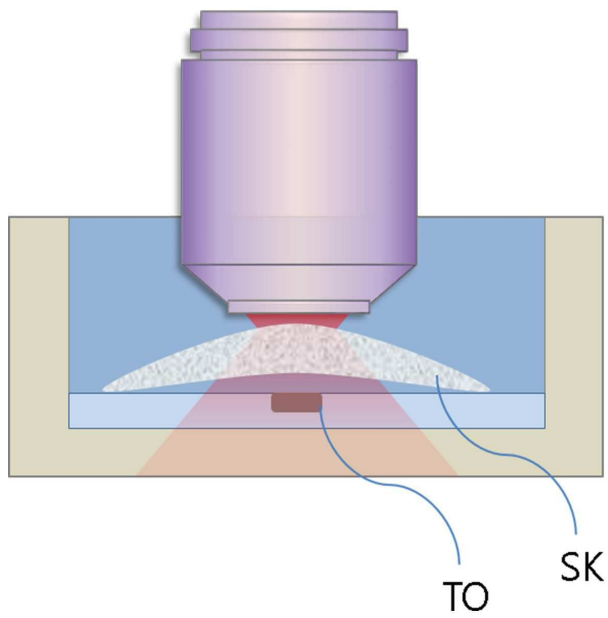
도면4f



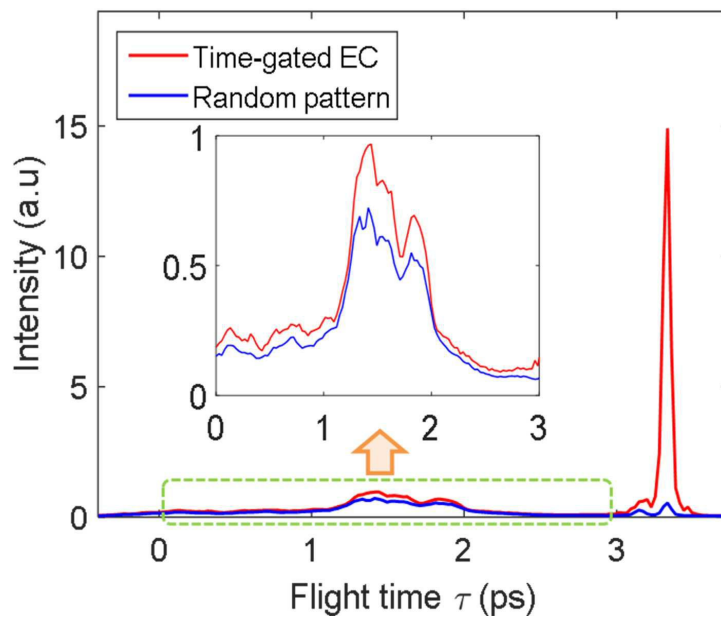
도면4g



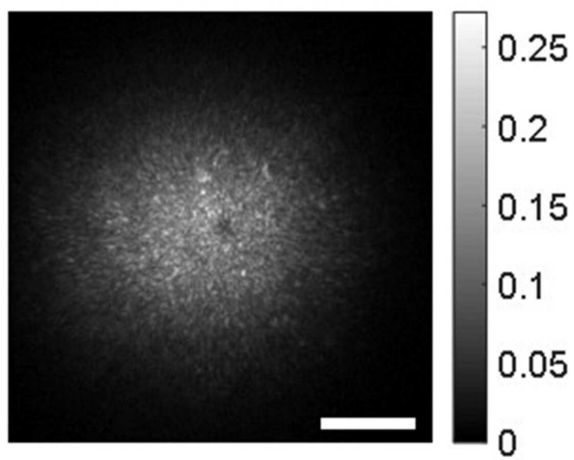
도면5a



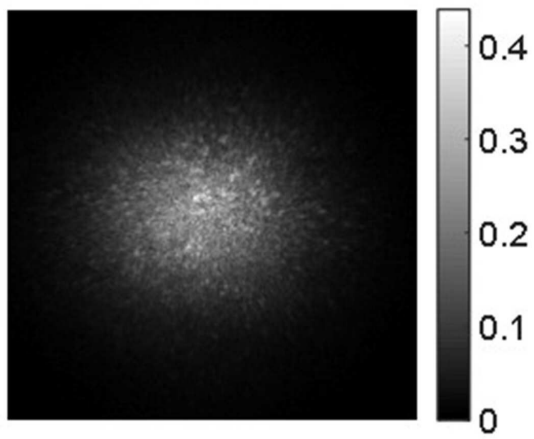
도면5b



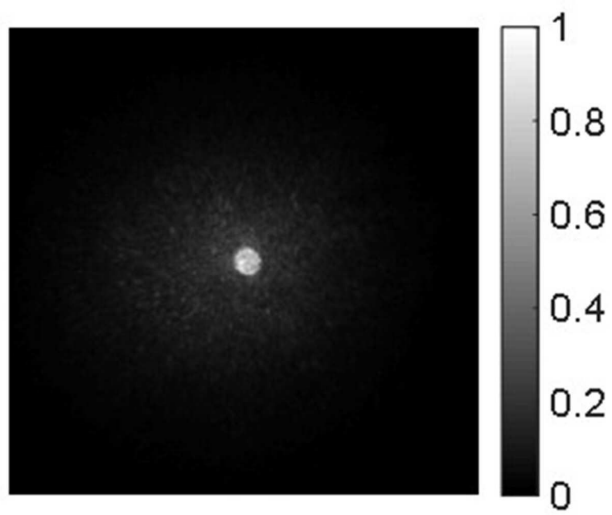
도면5c



도면5d



도면5e



도면5f

