(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2017년10월10일
(11) 등록번호 10-1783404
(24) 등록일자 2017년09월25일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G03H 1/00 (2006.01) *G03H 1/22* (2006.01)
(52) CPC특허분류
G03H 1/0005 (2013.01)
G03H 1/2249 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2016-0129472
(22) 출원일자 2016년10월07일
심사청구일자 2016년10월07일
(56) 선행기술조사문헌
저널 'New Journal of Physics', Vol. 14, p. 073051 (2012. 07. 27. 공개)
JP03101419 A
JP4862202 B2

(73) 특허권자
한국과학기술원
대전광역시 유성구 대학로 291(구성동)
(72) 발명자
안재욱
대전광역시 유성구 대학로 291 (구성동 23,한국과학기술원)
김효섭
대전광역시 유성구 대학로 291 (구성동 23,한국과학기술원)
이우준
대전광역시 유성구 대학로 291 (구성동 23,한국과학기술원)
(74) 대리인
김성호

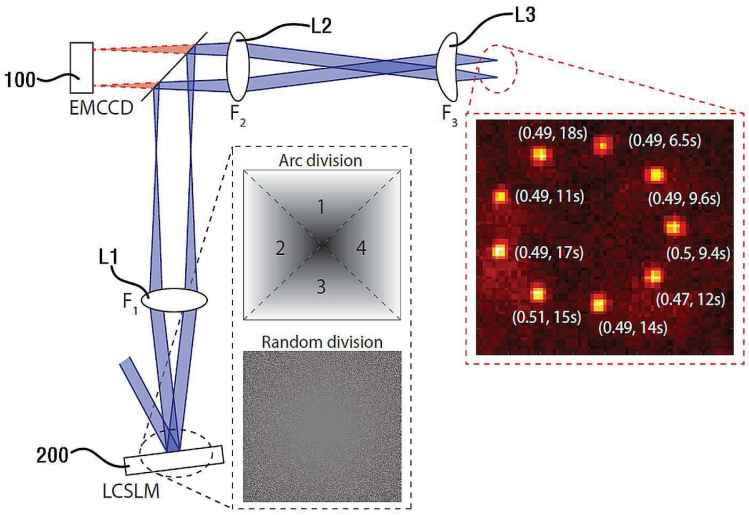
전체 청구항 수 : 총 10 항 심사관 : 이민형

(54) 발명의 명칭 **홀로그램을 통한 광포획 원자 수송 장치 및 방법**

(57) 요 약

본 발명에 따른 광포획 원자 수송 장치는 입사광을 변조하여 제1 홀로그램을 생성하는 광변조기, 상기 제1 홀로그램을 중간 이미지면(intermediate image plane)에 이미징하여, 임의의 포텐셜 형상을 가진 제1 홀로그램 이미지를 형성하는 제1 렌즈, 상기 제1 홀로그램 이미지를 제3 렌즈의 입사 동공에 리이미징시키는 제2 렌즈, 상기 제2 렌즈의 리이미징에 의해 형성된 제2 홀로그램을 광포획된 원자열이 존재하는 면에 다시 리이미징시키는 제3 렌즈, 상기 광포획된 원자열이 존재하는 면에서 생성된 제2 홀로그램 이미지로부터 광포획된 저온 원자를 캡처하는 촬상 소자, 및 상기 촬상 소자에 의해 캡처된 광포획 원자 이미지에 기초하여, 상기 제2 홀로그램 이미지를 조종하도록 상기 광변조기를 제어하는 컨트롤러를 포함한다. 이에 의하여 광포획된 원자열을 임의의 위치로 용이하게 수송할 수 있게 된다.

대 표 도 - 도2



(52) CPC특허분류
G03H 1/2294 (2013.01)
G03H 2001/0077 (2013.01)
G03H 2001/221 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 G01160014
부처명 산업체
연구관리전문기관 재단법인 삼성미래기술육성재단
연구사업명 산업체연구개발사업
연구과제명 테라헤르츠 클록속도의 다중얽힘 원자큐빗 양자전산(3차년도)
기 여 율 100/100
주관기관 재단법인 삼성미래기술육성재단
연구기간 2016.01.01 ~ 2016.12.31
공지예외적용 : 있음

명 세 서

청구범위

청구항 1

입사광을 변조하여 제1 홀로그램을 생성하는 광변조기;

상기 제1 홀로그램을 중간 이미지면(intermediate image plane)에 이미징하여, 임의의 포텐셜 형상을 가진 제1 홀로그램 이미지를 형성하는 제1 렌즈;

상기 제1 홀로그램 이미지를 제3 렌즈의 입사 동공에 리이미징시키는 제2 렌즈;

상기 제2 렌즈의 리이미징에 의해 형성된 제2 홀로그램을 광포획된 원자열이 존재하는 면에 다시 리이미징시키는 제3 렌즈;

상기 광포획된 원자열이 존재하는 면에서 생성된 제2 홀로그램 이미지로부터 광포획된 저온 원자를 캡처하는 촬상 소자; 및

상기 촬상 소자에 의해 캡처된 광포획 원자 이미지에 기초하여, 상기 제2 홀로그램 이미지를 조종하도록 상기 광변조기를 제어하는 컨트롤러;를 포함하는 광포획 원자 수송 장치.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 촬상 소자는 EMCCD(electron multiplying charge-coupled device)인 광포획 원자 수송 장치.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 광변조기는 LCSLM(liquid crystal spatial light modulator)인 광포획 원자 수송 장치.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 광변조기는 $8\mu m^2$의 크기의 픽셀로 이루어진 1920×1080 어레이로 구성되는 광포획 원자 수송 장치.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 제1 렌즈 및 제2 렌즈의 초점거리는 200mm인 광포획 원자 수송 장치.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 제3 렌즈는 4mm의 초점거리를 갖는 대물렌즈인 광포획 원자 수송 장치.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 제2 홀로그램 이미지는 빔 반경(ω_0)이 1.14㎛이고, 포획 깊이(U)가 1.4mK이며, 광학적 세기(P_0)가 3.4mW인 광포획 원자 수송 장치.

청구항 8

입사광을 변조하여 제1 홀로그램을 생성하는 단계;

상기 제1 홀로그램을 중간 이미지면에 이미징하여, 임의의 포텐셜 형상을 가진 제1 홀로그램 이미지를 형성하는 단계;

상기 제1 홀로그램 이미지를 제1 리이미징하는 단계;

상기 제1 리이미징에 의해 형성된 제2 홀로그램을 광포획된 원자열이 존재하는 면에 제2 리이미징하는 단계; 및

상기 광포획된 원자열이 존재하는 면에서 생성된 제2 홀로그램 이미지로부터 광포획된 저온 원자를 캡처하는 단계;를 포함하는 광포획 원자 수송 방법.

청구항 9

제8항에 있어서,

상기 캡처에 의해 생성된 광포획 원자 이미지에 기초하여, 상기 제2 홀로그램 이미지를 조종하는 단계를 더 포함하는 광포획 원자 수송 방법.

청구항 10

제8항에 있어서,

상기 제2 홀로그램 이미지는 빔 반경(ω_0)이 1.14㎛이고, 포획 깊이(U)가 1.4mK이며, 광학적 세기(P_0)가 3.4mW인 광포획 원자 수송 방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 홀로그램을 통한 광포획 원자 수송 장치 및 방법에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 홀로그래픽 기법을 사용하여 저온 단원자 열(single-atom array)의 광포획 이후에 상기 광포획된 원자열을 홀로그래픽 기법을 사용하여 공간상의 임의의 위치로 수송하기 위한 원자 수송 장치에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 저온 중성원자를 이용한 양자전산 분야에서는 양자계인 중성원자를 특정 위치에 포획하는 것이 매우 중요하다. 그리고, 저온 중성원자는 초고진공 환경에 놓여 외부와 차단된 상태를 유지해야 양자상태의 결맞음을 유지할 수 있다. 따라서, 이러한 두 가지 조건을 모두 만족하는 광포획(optical trapping)이라는 기술이 많이 사용되고 있다.

[0003] 저온 중성원자의 광포획은 빛에 의해 중성원자에 인가되는 포텐셜 변화를 사용한다. 빛의 세기에 비례하는 포텐셜이 중성원자에 작용하기 때문에, 빛이 반지름 1㎛가량으로 작게 집속되면 어트랙티브 포텐셜(attractive potential)일 경우 빛이 집속된 영역에 단원자(single atom)가 포획될 수 있다. 포텐셜 세기는 ~mK 이하이므로 저온 상태가 필수적이다.

[0004] 광포획 기술 중 하나인 옵티컬 스탠딩 웨이브(optical standing wave)는 결맞음 빛(laser)의 간섭 효과를 이용하여 주기적인 포텐셜을 형성하고 거기에 단원자들을 포획하여 단원자열(single-atom array)을 형성할 수 있다. 나아가, 상호 간섭하는 빛의 주파수를 약간 다르게 함으로써 일직선 방향으로의 원자 수송이 가능하다.

[0005] 다만, 종래의 다양한 기술을 이용하여 포획된 원자열을 임의의 위치로 수송하는 데에는 많은 어려움이 있었다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0006] 본 발명은 상기 문제점을 감안하여 안출된 것으로, 본 발명의 목적은 광포획된 원자열을 임의의 위치로 수송할 수 있는 광포획 원자 수송 장치 및 방법을 제공함에 있다.

과제의 해결 수단

[0007] 상기 목적을 달성하기 위한 본 발명에 따른 광포획 원자 수송 장치는, 입사광을 변조하여 제1 홀로그램을 생성하는 광변조기, 상기 제1 홀로그램을 중간 이미지면(intermediate image plane)에 이미징하여, 임의의 포텐셜 형상을 가진 제1 홀로그램 이미지를 형성하는 제1 렌즈, 상기 제1 홀로그램 이미지를 제3 렌즈의 입사 동공에 리이미징시키는 제2 렌즈, 상기 제2 렌즈의 리이미징에 의해 형성된 제2 홀로그램을 광포획된 원자열이 존재하는 면에 다시 리이미징시키는 제3 렌즈, 상기 광포획된 원자열이 존재하는 면에서 생성된 제2 홀로그램 이미지로부터 광포획된 저온 원자를 캡처하는 촬상 소자, 및 상기 촬상 소자에 의해 캡처된 광포획 원자 이미지에 기초하여, 상기 제2 홀로그램 이미지를 조종하도록 상기 광변조기를 제어하는 컨트롤러를 포함한다.

[0008] 그리고, 상기 촬상 소자는 EMCCD(electron multiplying charge-coupled device)일 수 있다.

[0009] 또한, 상기 광변조기는 LCSLM(liquid crystal spatial light modulator)일 수 있다.

[0010] 그리고, 상기 광변조기는 $8\mu m^2$의 크기의 픽셀로 이루어진 1920?1080어레이로 구성될 수 있다.

[0011] 또한, 상기 제1 렌즈 및 제2 렌즈의 초점거리는 200mm일 수 있다.

[0012] 그리고, 상기 제3 렌즈는 4mm의 초점거리를 갖는 대물렌즈일 수 있다.

[0013] 또한, 상기 제2 홀로그램 이미지는 빔 반경(?$_0$)이 1.14㎛이고, 포획 깊이(U)가 1.4mK이며, 광학적 세기(P_0)가 3.4mW일 수 있다.

[0014] 상기 목적을 달성하기 위한 본 발명에 따른 광포획 원자 수송 방법은, 입사광을 변조하여 제1 홀로그램을 생성하는 단계, 상기 제1 홀로그램을 중간 이미지면에 이미징하여, 임의의 포텐셜 형상을 가진 제1 홀로그램 이미지를 형성하는 단계, 상기 제1 홀로그램 이미지를 제1 리이미징하는 단계, 상기 제1 리이미징에 의해 형성된 제2 홀로그램을 광포획된 원자열이 존재하는 면에 제2 리이미징하는 단계, 및 상기 광포획된 원자열이 존재하는 면에서 생성된 제2 홀로그램 이미지로부터 광포획된 저온 원자를 캡처하는 단계를 포함한다.

[0015] 또한, 상기 캡처에 의해 생성된 광포획 원자 이미지에 기초하여, 상기 제2 홀로그램 이미지를 조종하는 단계를 더 포함할 수 있다.

발명의 효과

[0016] 상기 구성에 따른 광포획 원자 수송 장치 및 방법에 의하면, 광포획된 원자열을 임의의 위치로 용이하게 수송할 수 있게 된다.

도면의 간단한 설명

[0017] 도 1a 내지 1c는 강도 플리커(intensity flicker)에 의한 포획 손실 시뮬레이션을 나타내는 도면이다.

도 2는 본 발명에 따른 광포획 원자 수송 장치의 구성을 나타내는 개략도이다.

도 3은 홀로그램 이미지인 광학 트위저의 개수(x축)에 따른 개별 트위저들의 상대 강도 표준편차(y축) 그래프이다.

도 4는 본 발명에 따른 광포획 원자 수송 장치에 의한 원자열 재배열 과정을 도시한다.

도 5는 본 발명에 따른 광포획 원자 수송 장치의 동작을 설명하기 위한 도면이다.

도 6은 도 5의 피드백을 이용하여, 최초 9개의 원자(최상단 도면)로부터 재배열된 1개의 원자, 2개의 원자, 3개의 원자, 그리고 4개의 원자의 최종 배열을 각각 도시한다.

도 7은 최종적으로 형성된 어레이의 로딩 효율을 나타내는 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0018] 후술하는 본 발명의 설명은 실시 가능한 특정 실시예를 예시로서 도시하는 첨부 도면을 참조한다. 설명되는 실시예는 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 본 발명을 실시하기에 충분한 정도로 설명된다. 본 발명의 다양한 실시예는 서로 다르지만 상호 배타적일 필요는 없음이 이해되어야 한다. 예를 들어, 여기에 기재되어 있는 특정 형상, 구조 및 특성은 일 실시예에 관련하여 본 발명의 정신 및 범위를 벗어나지 않으면서 다른 실시예로 구현될 수 있다.

[0019] 또한, 각각의 개시된 실시예 내의 개별 구성요소의 위치 또는 배치는 본 발명의 정신 및 범위를 벗어나지 않으면서 변경될 수 있음이 이해되어야 한다. 따라서, 후술하는 상세한 설명은 한정적인 의미로서 취하려는 것이 아니며, 본 발명의 범위는, 적절하게 설명된다면, 그 청구항들이 주장하는 것과 균등한 모든 범위와 더불어 첨부된 청구항에 의해서만 한정된다. 도면에서 유사한 참조부호는 여러 측면에 걸쳐서 동일하거나 유사한 기능을 지칭한다.

[0020] 이하에서는 첨부된 도면을 참조하면서 본 발명에 대해 상세히 설명하기로 한다. 도 1a 내지 1c는 강도 플리커(intensity flicker)에 의한 포획 손실 시뮬레이션을 나타내는 도면이다.

[0021] 구체적으로, 도 1a는 본 발명에 따른 광포획 원자 수송 장치에 의해 생성된 광포획 원자열의 광학 이미지를 나타낸다. 도 1a의 제1 프레임(Hologram 1)과 제2 프레임(Hologram 2)을 비교하면, 상단 2개의 행에 위치하는 열이 위로 약간 시프트(shift)된 것을 볼 수 있다. 한편, 도 1a의 중간에 도시된 도면(in-between)은 제1 프레임에서 제2 프레임으로 변화하면서 캡처된 사진이다.

[0022] 도 1b는 포획 손실 시뮬레이션에서 사용되는 트랜션트 포텐셜(transient potential)을 나타내는 도면으로, 포획폭(trap waist)(ω_0)이 1.14㎛이고, 트랜션트 시간(τ)은 1/f(f는 프레임 레이트)이며, 디스플레이스먼트(displacement)는 $\omega_0/18$이다.

[0023] 한편, 도 1c는 종래의 몬테 카를로 시뮬레이션 결과로서, 이는 강도 플리커에 의해 야기된 포획 손실의 모습을 보여주며, p로 정규화된(normalized) 색상 스케일은 시간 τ에서의 손실 가능성을 나타내며, p는 최초 포획 조건(T/U=1/18~1/12)에 따라 0.005에서 0.04 사이의 값을 갖는다.

[0024] 홀로그래픽 광학 트위저는 홀로그램이 업데이트되는 동안 광포획된 원자들을 유지할 수 없는 것으로 알려져 왔고, 강도 플리커가 그 이유로 지적되어 왔다. IFTA에 의해 생성된 개별 홀로그램이 원하는 광학 포텐셜을 생성한다 해도, 프레임간 변화는 도 1a에 도시된 바와 같이 중간 상태에서 적절한 포텐셜이 유지된다는 보장이 없었다. 이러한 강도 플리커링(flickering)은 광학 포텐셜의 전체 영역에 걸쳐 불규칙한 양상을 보였다.

[0025] 디지털 마이크로미터 장치(DMD, 50kHz 프레임)와 같은 고속 장치라 할지라도 광포획 원자는 손실되기 마련이었다. 포획 진동수 $f_r = 1/2\pi\sqrt{4U/m\omega_0^2}$ (여기서, m은 단일 원자 중량이고 f는 장치의 프레임 레이트)로 수행되는 포획 손실 시뮬레이션은 강도 플리커링이 포획 안정성을 저해함을 보여준다(도 1c 참조).

[0026] 특히, 단열 영역(adiabatic region)($f_r \gg f$)(도 1c의 영역)에서 고정 손실 부분(constant portion of loss)이 존재한다. 비단열 영역(non-adiabatic region)($f_r < f$)에서 단일 스텝은 원자를 손실하지 않는다. 하지만, 이 영역에서는, 원자가 디스플레이스먼트 히팅에 의해 빠르게 가열되어 버린다(도 1c의 영역). 혹은, 현재의 기술로는 적용할 수 없는 영역(도 1c의 영역)이 존재한다. 따라서, 홀로그래픽 단일 원자 수송을 위한 대체적인 알고리즘이 필요하다.

[0027] 도 2는 본 발명에 따른 광포획 원자 수송 장치의 구성을 나타내는 개략도이다. 도 2에 도시된 바와 같이 본 발명에 따른 광포획 원자 수송 장치는 촬상 소자(100) 및 광변조기(200) 및 이들을 제어하는 컨트롤러(미도시)를 포함한다.

[0028] 촬상 소자(100)는 EMCCD(electron multiplying charge-couplded device)일 수 있다. EMCCD는 전하의 축적과 전송을 이용한 기록 소자로서, 후술할 홀로그램 이미지를 캡처하는 기능을 가진다.

[0029] 광변조기(200)는 LCSLM(liquid crystal spatial light modulator)일 수 있고, 이는 홀로그래픽 장치에 해당한다. 광변조기는 1920?1080픽셀(pixel)로 이루어진 리플렉티브 페이즈 모듈레이터 어레이로 이루어지며, 각 픽셀은 8㎛^{2}의 크기를 가지며, ~50%의 1차(first order) 회절률(diffraction efficiency)을 가질 수 있지만 이에 한정되지 않는다.

[0030] SLM으로부터 회절된 빔은 초점거리(F_1)가 200mm인 제1 렌즈(L1)에 의하여 중간 이미지(intermediate image) 상에 이미징되며, 그 이후 초점거리(F_2)가 200mm인 제2 렌즈에 의해 대물렌즈(L3)의 초점면(focal plane)에 다시 이미징된다. SLM으로부터의 $2F_1$-$2F_2$의 기하구조는 홀로그램을 실험 챔버 내의 최종 이미지 면에 매우 효율적으로 만들어낸다.

[0031] 대물 렌즈(L3)는 초점 거리(F3)가 4mm일 수 있고, 개구수(numerical aperture)(NA)가 0.5이며 3.5mm 두께의 글래스 플레이트 컴펜세이션을 가지며, 장거리 작동거리가 16mm일 수 있지만, 이에 한정되지 않는다.

[0032] 최종 이미지면상에 생성된 광학 트위저들은 각각 빔 반경(ω_o)이 1.14㎛, 포획 깊이(U)가 1.4mK, 광학적 세기(P_0)가 3.4mW일 수 있다. 레이저 파워가 1.1W로 주어지면, 광경로 상의 손실 및 랜덤 디비전 알고리즘의 효율을 고려하면 9개의 광학 트위저를 이룰 수 있다.

[0033] 다시, 도 2를 참조하면, 광변조기(200)에서 빛이 변조되고, 그 빛은 제1 렌즈(L1)를 거쳐 반사된 뒤 제2 렌즈(L2)에 이미지를 형성하고, 상기 제2 렌즈(L2)를 통과한 이미지가 대물 렌즈(L3)를 거쳐 최종 홀로그램 이미지를 생성한다. 촬상 소자(100)는 이렇게 생성된 이미지에 광포획된 원자 신호를 캡처하고, 컨트롤러(미도시)는 촬상 소자(100)가 생성한 이미지에 기초하여 광변조기(200)를 제어함으로써, 원자열을 이동시키기 위한 홀로그램 이미지를 순차적으로 생성시킨다.

[0034] 도 2의 광변조기(200)는 아크 디비전으로 영역을 분할할 수도 있지만, 랜덤 디비전으로 영역을 분할할 수도 있다. 다만, 랜덤 디비전으로 영역을 분할하는 것이 더욱 규칙적인 강도를 만들어내기 때문에 바람직하다. 따라서, 본 발명에 따른 광포획 원자 수송 장치에 이용되는 광변조기(200)는 랜덤 디비전을 이용한다.

[0035] 시뮬레이션에서는 제3 렌즈(L3)를 거쳐 최종적으로 생성된 홀로그램을 이용하여 9개의 원자를 이동시켰고, 이는 도 2에 도시된 바와 같다. 다만, 본 발명에 따른 광포획 원자 수송 장치는 9개의 원자가 아닌 더 많거나 더 적은 수의 광포획 원자를 수송할 수 있다.

[0036] 도 3은 홀로그램 이미지인 광학 트위저의 개수(x축)에 따른 개별 트위저들의 상대 강도 표준편차(y축) 그래프이다.

[0037] 구체적으로, 도 3에서는 광변조기에 입사되는 빛의 반지름(W=1~4mm)에 대해 각각 도시되어 있다. 표준편차가 작을수록 균일한 트위저열이 생성되어 수송 손실의 상한치가 줄어든다. 트위저의 개수는 빛의 전력에 의해 제한되고 입사되는 빛의 반지름은 대물렌즈의 동공 크기에 의해 제한되는데, 예시로 9개의 트위저와 2mm의 반지름을 사용한 경우의 강도 히스토그램이 도 3에 나타나 있다.

[0038] 도 4는 본 발명에 따른 광포획 원자 수송 장치에 의한 원자열 재배열 과정을 도시한다. 도 4의 (a)와 같이 배열된 원자열이 광변조기(200)에 의해 변화하는 홀로그램 이미지에 의하여, 시간이 지날수록 간격이 벌어지는 것을 볼 수 있다. 본 시뮬레이션에서, 도 4의 (a)의 각 원자간 거리(d)는 4.4um였지만, 900ms 이후 각 원자간 거리(d)는 2배로 멀어졌다(도 4의 (e)참조).

[0039] 도 5는 본 발명에 따른 광포획 원자 수송 장치의 동작을 설명하기 위한 도면으로, 컨트롤러(미도시)에 의한 피드백 컨트롤 루프를 도시한다. 즉, 시간 1s에서 광변조기(200)가 홀로그램 이미지를 생성하여 원자(Atom)를 이동시키면, 그 영상을 촬상 소자(100)가 캡처하고, 캡처된 영상에 기초하여 다시 광변조기(200)를 제어하여 포텐셜이 다른 이미지를 생성하여 원자(Atom)를 이동시키며, 이와 같은 과정이 계속적으로 반복되면서, 원하는 위치로 원하는 거리만큼 원자(Atom)를 이동시키게 된다.

[0040] 도 6은 도 5의 피드백을 이용하여, 최초 9개의 원자(최상단 도면)로부터 재배열된 1개의 원자, 2개의 원자, 3개의 원자, 그리고 4개의 원자의 최종 배열을 각각 도시한다. 한편, 도 7은 최종적으로 형성된 어레이의 로딩 효율 곡선을 나타낸다.

[0041] 도 7에 도시된 P_lim은 피드백을 이용한 어레이의 로딩에서 원자 손실이 없을 경우 기대되는 이론치이며, P_exp는 실험치이다. 0.5^N은 피드백이 없을 경우 기대되는 낮은 로딩 확률이다.

[0042] 이상의 실시예와 관련하여 설명된 특징, 구조, 효과 등은 본 발명의 하나의 실시예에 포함되며, 반드시 하나의 실시예에만 한정되는 것은 아니다. 나아가, 각 실시예에서 예시된 특징, 구조, 효과 등은 실시예들이 속하는 분야의 통상의 지식을 가지는 자에 의해 다른 실시예들에 대해서도 조합 또는 변형되어 실시 가능하다. 따라서 이러한 조합과 변형에 관계된 내용은 본 발명의 범위에 포함되는 것으로 해석되어야 할 것이다.

[0043] 또한, 이상에서 실시예를 중심으로 설명하였으나 이는 단지 예시일 뿐 본 발명을 한정하는 것이 아니며, 본 발명이 속하는 분야의 통상의 지식을 가진 자라면 본 실시예의 본질적인 특성을 벗어나지 않는 범위에서 이상에 예시되지 않은 여러 가지의 변형과 응용이 가능함을 알 수 있을 것이다. 예를 들어, 실시예에 구체적으로 나타난 각 구성 요소는 변형하여 실시할 수 있는 것이다. 그리고 이러한 변형과 응용에 관계된 차이점들은 첨부된 청구 범위에서 규정하는 본 발명의 범위에 포함되는 것으로 해석되어야 할 것이다.

부호의 설명

[0044] 100: 촬상 소자

200: 광변조기

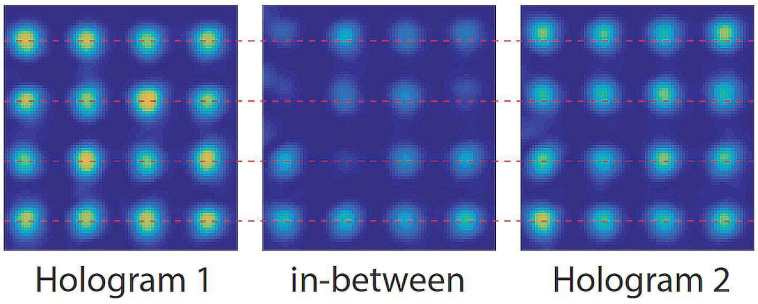
L1: 제1 렌즈

L2: 제2 렌즈

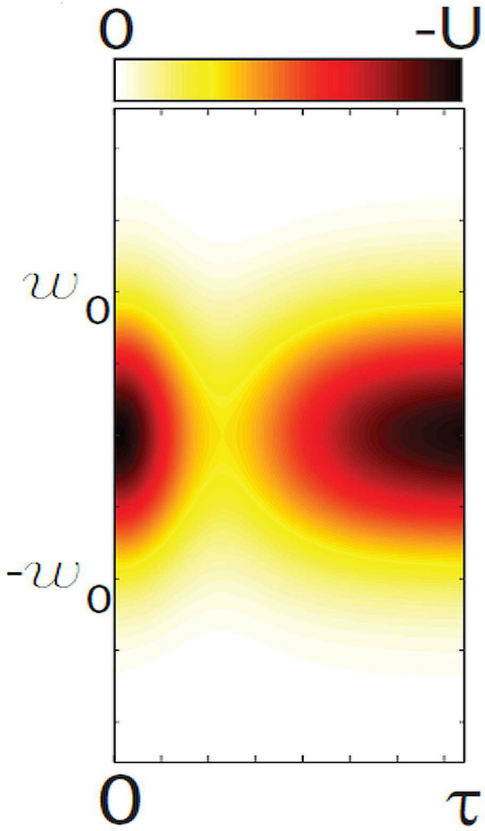
L3: 제3 렌즈

도면

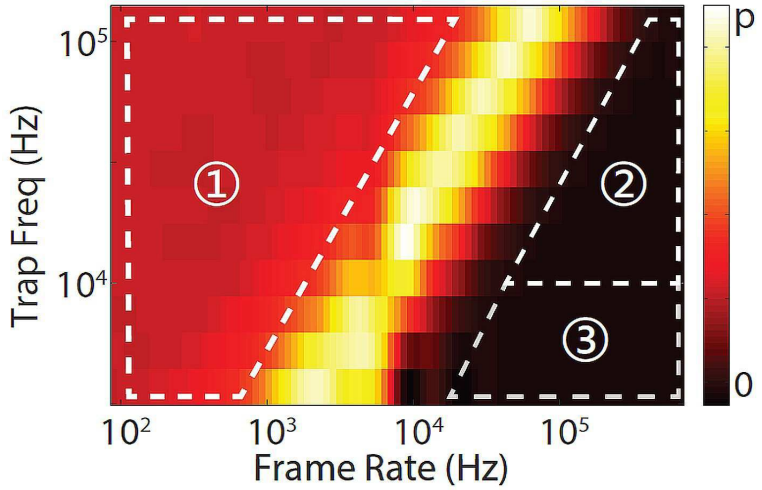
도면1a



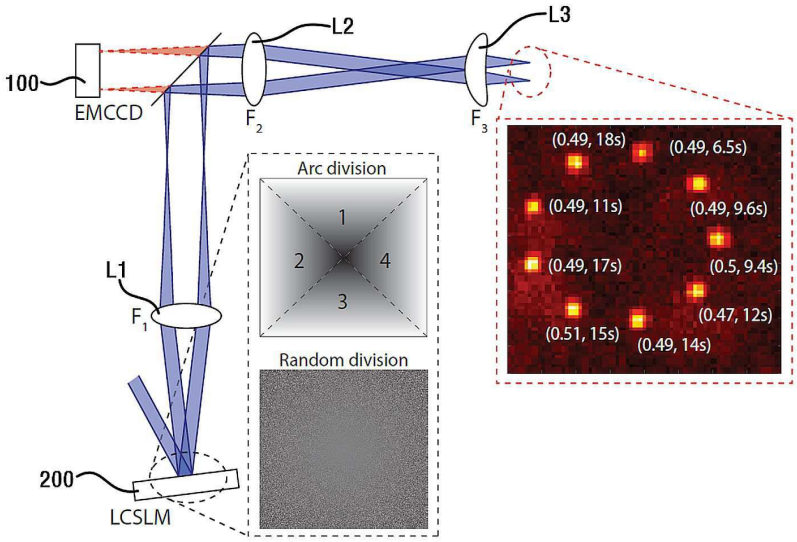
도면1b



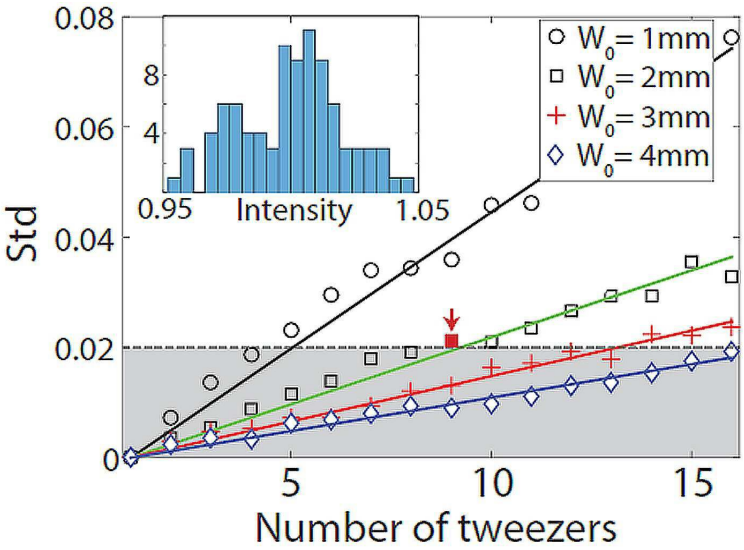
도면1c


Trap Freq (Hz)
10^5
10^4
①
②
③
p
0
10^2
10^3
10^4
10^5
Frame Rate (Hz)

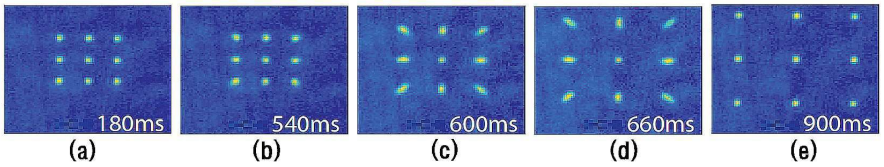
도면2


100
EMCCD
L2
L3
F_2
F_3
L1
F_1
200
LCSLM
Arc division
1
2
3
4
Random division
(0.49, 18s)
(0.49, 6.5s)
(0.49, 11s)
(0.49, 9.6s)
(0.49, 17s)
(0.5, 9.4s)
(0.47, 12s)
(0.51, 15s)
(0.49, 14s)

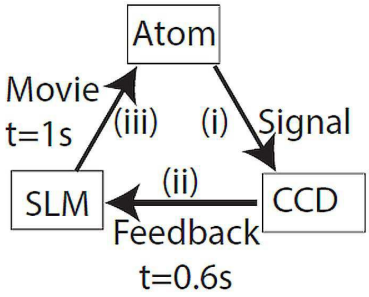
도면3


0.08
0.06
0.04
0.02
0
Std
8
4
0.95
Intensity
1.05
W0= 1mm
W0= 2mm
W0= 3mm
W0= 4mm
5
10
15
Number of tweezers

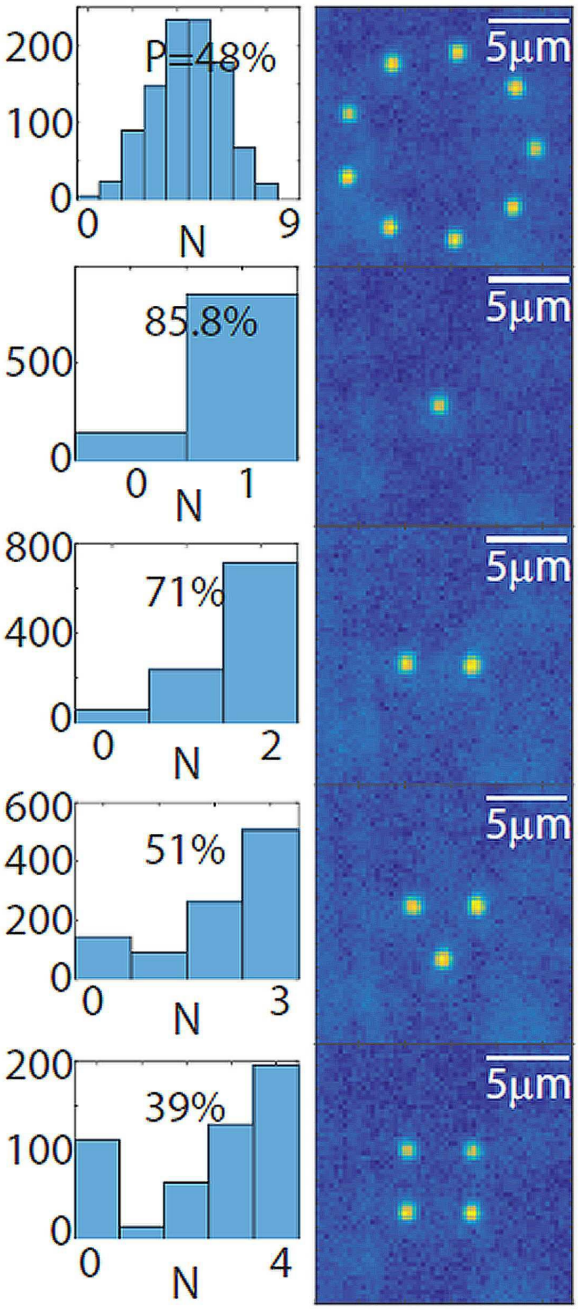
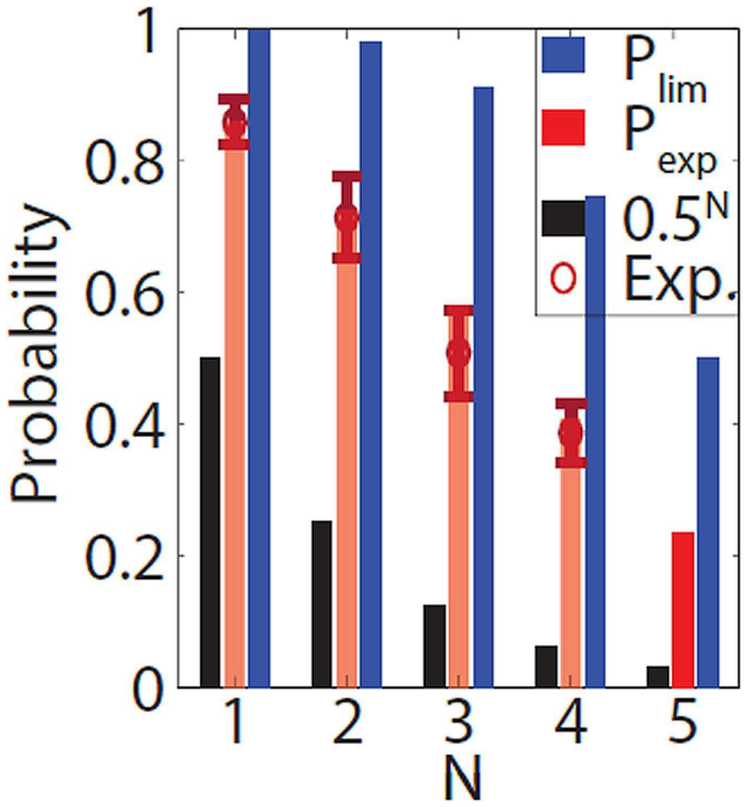
도면4


180ms
540ms
600ms
660ms
900ms
(a)
(b)
(c)
(d)
(e)

도면5


Atom
Movie
t=1s
(iii)
(i)
Signal
SLM
(ii)
CCD
Feedback
t=0.6s

도면6


200
100
0
P=48%
0
N
9
5μm
500
0
85.8%
0
N
1
5μm
800
400
0
71%
0
N
2
5μm
600
400
200
0
51%
0
N
3
5μm
200
100
0
39%
0
N
4
5μm

도면7