(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2022-0095703
(43) 공개일자 2022년07월07일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G03H 1/26 (2006.01) *G03H 1/10* (2006.01)
(52) CPC특허분류
G03H 1/268 (2013.01)
G03H 1/10 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2020-0187475
(22) 출원일자 2020년12월30일
심사청구일자 2020년12월30일

(71) 출원인
한국과학기술원
대전광역시 유성구 대학로 291(구성동)
(72) 발명자
안재욱
대전광역시 유성구 대학로 291(구성동)
선하은
대전광역시 유성구 대학로 291(구성동)
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
피앤피특허법인

전체 청구항 수 : 총 4 항

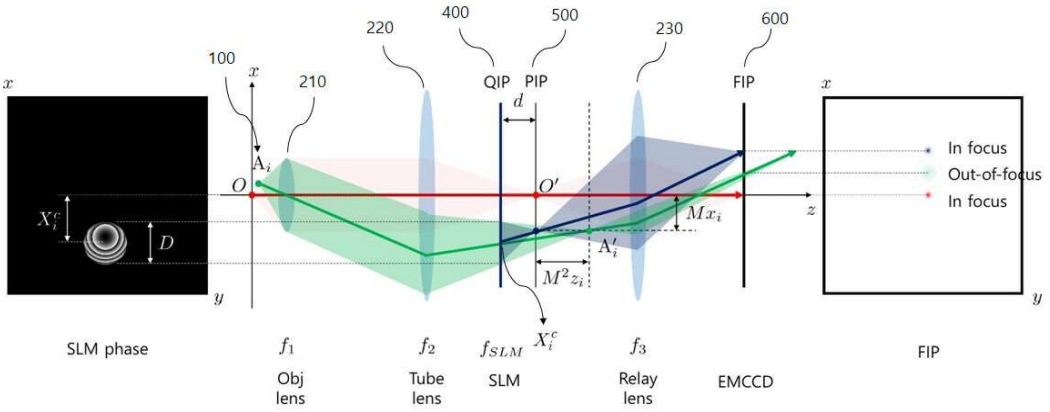
(54) 발명의 명칭 **복수의 점 광원을 한 평면에 투영하는 3차원 홀로그래픽 이미지 생성장치 및 생성방법**

(57) 요 약

본 발명은 3차원으로 배열된 3차원큐빗모델을 2차원으로 동시에 촬영하여 빠른 속도로 큐빗을 검출할 수 있도록 한 3차원 홀로그래픽 이미지 생성장치 및 그것을 이용한 3차원 홀로그래픽 이미지 생성방법에 관한 것이다. 이를 위하여, 본 발명은 이미징빔을 가해 3차원큐빗모델을 구성하는 각각의 큐빗이 큐빗형광빔을 방출하도록 하는 형광부; 상기 큐빗형광빔을 원하는 경로로 변경시켜주는 렌즈부; 정해진 각 위치마다 상기 큐빗형광빔의 위상을 각각 변조하여 초점의 위치를 제어하는 광변조부; 상기 광변조부에 의해 변조된 큐빗형광빔을 2차원 이미지로 촬상하는 촬상부를 포함하여 구성되는 3차원 홀로그래픽 이미지 생성장치를 제공한다.

따라서, 본 발명에 의하면, 3차원큐빗모델의 준비 및 검출시간을 대폭적으로 줄일 수 있어 검출할 수 있는 큐빗의 개수를 대폭 증가시킬 수 있는 이점이 있다.

대 표 도 - 도3



(52) CPC특허분류
G03H 2225/32 (2013.01)
(72) 발명자
송윤홍
대전광역시 유성구 대학로 291(구성동)
변우정
대전광역시 유성구 대학로 291(구성동)

명 세 서

청구범위

청구항 1

이미징빔을 가해 3차원큐빗모델을 구성하는 각각의 큐빗이 큐빗형광빔을 방출하도록 하는 형광부;

상기 큐빗형광빔을 원하는 경로로 변경시켜주는 렌즈부;

정해진 각 위치마다 상기 큐빗형광빔의 위상을 각각 변조하여 초점의 위치를 제어하는 광변조부;

상기 광변조부에 의해 변조된 큐빗형광빔을 2차원 이미지로 촬상하는 촬상부를 포함하여 구성되는 3차원 홀로그래픽 이미지 생성장치.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 렌즈부는,

상기 3차원큐빗모델에 의해 방출된 큐빗형광빔의 경로를 변경시키는 제1렌즈;

상기 광변조부를 통과한 큐빗형광빔을 설정된 초점거리가 되도록 굴절시키는 제2렌즈를 포함하는 것을 특징으로 하는 3차원 홀로그래픽 이미지 생성장치.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 제1렌즈와 제2렌즈 사이에는 편광방향을 변화시키는 위상지연판 및 특정 편광만 통과시키는 편광판이 설치되는 것을 특징으로 하는 3차원 홀로그래픽 이미지 생성장치.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 광변조부는 상기 큐빗형광빔의 진행방향에 수직인 XY평면상에 구비되고, 상기 3차원큐빗모델에 속하는 원자의 위치 (x,y,z), 렌즈부의 위치, 광변조부의 위치가 저장되며, 상기 저장된 원자의 위치 (x,y,z), 렌즈부의 위치 및 광변조부의 위치를 기초로 하여 광변조부의 XY평면상의 각 위치마다 변경시킬 위상을 홀로그래픽하게 변조하는 것을 특징으로 하는 3차원 홀로그래픽 이미지 생성장치.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 복수의 점 광원을 한 평면에 투영하는 3차원 홀로그래픽 이미지 생성장치 및 생성방법에 관한 것이며, 구체적으로 3차원으로 배열된 3차원큐빗모델을 2차원으로 동시에 촬영하여 빠른 속도로 큐빗을 검출할 수 있도록 한 복수의 점 광원을 한 평면에 투영하는 3차원 홀로그래픽 이미지 생성장치 및 생성방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 양자컴퓨터를 구현하기 위해서는 양자정보의 최소단위인 큐빗(qubit)을 각각 제어할 수 있어야 한다.

[0003] 큐빗은 고전적인 비트(bit)와 다르게 결맞음 시간(coherence time)동안 양자중첩이 가능하고, 이 특성을 이용하면 병렬처리가 가능하여 고전컴퓨터보다 빠른 연산이 가능하며, 큐빗의 상태는 최종결과를 여러 번 측정하여 알 수 있다.

[0004] 예를 들어, 4개의 큐빗이 존재할 경우 양자컴퓨터에서는 기존처럼 16개(2^4)의 연산을 순차적으로 계산하는 것이 아니라 16개의 연산이 일순간에 계산되어 처리속도가 비약적으로 빨라지는 장점이 있다.

[0005] 하지만, 많은 수의 큐빗을 한정된 공간에 위치시키는 것은 어려움이 따른다. 많은 수의 큐빗을 구성하려면 큐빗의 1차원 또는 2차원적인 배열에는 한계가 있어 3차원적으로 큐빗을 배열해야 한다.

[0006] 이를 위해, 도 1과 같이 각각의 단일원자들을 모아서 3차원 원자구조체를 만들 수 있으며, 이러한 3차원 원자구조체는 도 2와 같이 여러 평면으로 나누어 같은 평면상에 있는 원자들을 각각 촬영하여 각각의 원자가 어떤 양자상태에 있는지 측정할 수 있다.

[0007] (K. D. Nelson, X. Li, D. S. Weiss, Nat Phys 3, 556-560(2007),

[0008] D. Barredo, W. Lienhard, S.d. Lseleeuc, T. Lahaye, A. Browaeys, Nature 561, 79-82(2018),

[0009] W. Lee, H. Kim and J. Ahn, Opt. Express 24, 9816-9825 (2016))

[0010] 하지만, 이러한 단층촬영 방법은 큐빗이 순간적으로 제어되어야 하는 양자컴퓨터에서 큐빗상태검출시간이 너무 오래 걸리는 문제점이 있다. 즉, 3차원을 구성하는 평면의 개수가 많아질 수록 그에 비례하여 큐빗상태검출시간이 길어지는데, 원자의 짧은 포획시간때문에 상태가 제대로 측정되지 않는 측정오류(State Preparation and Measurement error : SPAM error, 상태준비 및 측정오류)가 발생하여 양자컴퓨터 개발의 걸림돌로 작용되고 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0011] 본 발명은 상기한 문제점을 해결하기 위한 것이며, 구체적으로 3차원큐빗모델을 검출하는 시간을 대폭적으로 줄여 검출할 수 있는 큐빗의 개수를 증가시킬 수 있는 3차원 홀로그래픽 이미지 생성장치를 제공하기 위한 것이다.

과제의 해결 수단

[0012] 상기한 목적을 달성하기 위하여, 본 발명은 3차원큐빗모델을 구성하는 각각의 큐빗이 큐빗형광빔을 방출하는 형광부; 상기 큐빗형광빔을 원하는 경로로 변경시켜주는 렌즈부; 정해진 각 위치마다 상기 큐빗형광빔의 위상을 각각 변경시켜 초점의 위치를 제어하는 광변조부; 상기 광변조부에 의해 변조된 큐빗형광빔을 2차원 이미지로 촬상하는 촬상부를 포함하여 구성되는 3차원 홀로그래픽 이미지 생성장치를 제공한다.

[0013] 상기 렌즈부는,상기 3차원큐빗모델에 의해 방출된 큐빗형광빔의 경로를 변경시키는 제1렌즈; 상기 광변조부를 통과한 큐빗형광빔을 설정된 초점의 위치가 되도록 굴절시키는 제2렌즈를 포함할 수 있다.

[0014] 상기 제1렌즈와 제2렌즈 사이에는 편광방향을 변화시키는 위상지연판 및 특정 편광만 통과시키는 편광판이 설치되는 것이 바람직하다.

[0015] 상기 광변조부는 상기 이미징빔의 진행방향에 수직인 XY평면상에 구비되고, 상기 3차원큐빗모델에 속하는 원자의 위치 (x,y,z), 렌즈부의 위치, 광변조부의 위치가 저장되며, 상기 저장된 원자의 위치 (x,y,z), 렌즈부의 위치 및 광변조부의 위치를 기초로 하여 광변조부의 XY평면상의 각 위치마다 변경시킬 위상을 결정하는 것이 바람직하다.

발명의 효과

[0016] 본 발명에 의하면, 3차원큐빗모델의 준비 및 검출시간을 대폭적으로 줄일 수 있어 검출할 수 있는 임의의 3차원 구조의 큐빗의 개수를 65개 이상으로 증가시킬 수 있는 이점이 있다.

[0017] 또한, 3차원큐빗모델을 준비할 때 단층촬영시 필요한 2차원 평면의 개수를 고려하지 않아도 되므로 3차원큐빗모델의 형상이 자유로워져 준비시간이 대폭 축소될 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0018] 도 1은 종래기술에 의해 원자들을 3차원상에 배열한 것을 촬상한 이미지;

도 2는 도 1을 촬영하기 위해 사용한 단층촬영을 나타내는 설명도;

도 3은 본 발명에 의한 3차원 홀로그래픽 이미지 생성장치를 나타내는 구성도;

도 4a는 3차원큐빗모델의 예시도;

도 4b는 광변조부에 의한 홀로그램 이미지를 나타내는 예시도;

도 4c는 촬상부에서 촬상된 이미지를 나타내는 실험결과도;

도 5a 내지 도 5e는 본 발명에 의한 3차원 홀로그래픽 이미지 생성장치의 실험결과를 나타내는 실험결과도;

도 6은 본 발명에 의한 3차원 홀로그래픽 이미지 생성방법을 나타내는 순서도.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0019] 본 발명에 의한 구체적인 실시예의 구성 및 작용에 대하여 도면을 참조하여 상세하게 설명한다.

[0020] 도 3을 참조하면, 본 발명에 의한 3차원 홀로그래픽 이미지 생성장치는 형광부(100), 렌즈부(210,220,230), 광변조부(400), 촬상부(600)를 포함하여 구성된다.

[0021] 큐빗상태를 만들어 주는 양자연산은 발명자 연구실의 리드버그(Rydberg) 양자컴퓨터(Hyosub Kim et.al. "Detailed balance of thermalization dynamics in Rydberg atom quantum simulators," Phys. Rev. Lett. 120, 180502 (2018). 참조)에 의해 행해진다. 리드버그 상태는 하나의 원자가 매우 높은 주양자수를 갖는 상태로 여기되는 것을 의미하며, 이러한 리드버그 상태를 이용하여 양자연산을 수행하는 장치를 리드버그 양자컴퓨터라고 한다.

[0022] 도 4a는 3차원큐빗모델의 한 예를 나타내며, 원자들이 3차원 공간상에서 정해진 위치에 배열된 상태를 나타낸다.

[0023] 본 실시예에서 상기 3차원큐빗모델에서 원자들의 배열은 한 평면상에서 존재하는 것이 아니라, 3차원상에 존재하므로 임의의 한 i원자에 대해 (x_i,y_i,z_i)의 좌표값을 가질 수 있다. 상기 z좌표는 형광부에 의한 큐빗형광빔이 진행되는 방향으로 설정될 수 있다.

[0024] 상기 3차원큐빗모델의 원자들은 미리 설정된 좌표에 위치되며, 이러한 위치좌표는 광변조부(400)에 저장될 수 있다.

[0025] 상기 형광부(100)는 상기 3차원큐빗모델을 촬영하기 위해 레이저를 이용한 이미징빔을 가해주어 큐빗이 큐빗형광빔을 방출하도록 하는 역할을 한다. 이때, i번째 원자 A_i의 위치는 원점에서 x 및 z 방향으로 떨어져 위치할 수 있다.

[0026] 상기 큐빗형광빔은 렌즈부(210,220,230)를 통과하면서 경로가 변경된다. 상기 렌즈부를 구성하는 렌즈는 상황에 따라 다양하게 설치될 수 있으며 본 실시예의 구성에 한정되지 않는다.

[0027] 상기 렌즈부는 제1렌즈(210), 제2렌즈(220), 제3렌즈(230)를 포함할 수 있으며, 제1렌즈(210) 및 제2렌즈(220)는 큐빗형광빔을 확대시키는 역할을 할 수 있다.

[0028] 즉, 제1렌즈(210)는 초점거리 f1= 4mm로 구비되고, 제2렌즈(220)는 초점거리 f2 = 200mm로 구비되어 4f 시스템을 구성할 수 있다. 그러면, 프라이머리 이미지평면(PIP, Primary Image Plane)의 원점(O')의 위치는 (0, 2L)이 된다. 여기서, L = f1 + f2이며, 프라이머리 이미지평면은 원점(O)에서 방사된 빛이 첫번째로 상이 맺히는 평면을 의미한다.

[0029] 상기 제1렌즈(210)를 통과한 큐빗형광빔은 제2렌즈(220)를 통과하면서 집광되며, 상기 제2렌즈(220)를 통과한 큐빗형광빔은 광변조부(400)로 입사된다.

[0030] 상기 광변조부(400)는 공간 광변조기(Spatial Light Modulator, SLM)을 이용하여 홀로그래픽하게 빛을 변조할 수 있으며, QIP(Quasi-image plane) 상에 위치하게 된다. 즉, 상기 광변조부(400)는 PIP보다 z방향으로 d만큼

이전인 z = 2L-d에 위치할 수 있다.

[0031] 상기 광변조부(400)는 에는 3차원큐빗모델에 속하는 원자의 위치(x,y,z), 렌즈부의 위치, 광변조부의 위치 및 상기 각 원자에 대응하는 광변조부상의 위치가 저장되며, 상기 저장된 원자의 위치 (x,y,z), 렌즈부의 위치 및 광변조부의 위치를 기초로 하여 광변조부의 XY평면상의 각 위치마다 변경시킬 위상을 결정한다.

[0032] 상기 광변조부(400)는 3차원큐빗모델에 속하는 각 원자의 위치(x,y,z)에 대응하는 광변조부 상의 위치(X,Y)마다 위상을 변경하고 진행방향을 변경시킴으로써 3차원큐빗모델에 대한 홀로그램을 생성시키는 역할을 한다.

[0033] 그러면, QIP에서 A_i에 위치한 원자에 대한 큐빗형광빔의 위상은 아래와 같이 될 수 있다.

$$\Phi_i(X) = \frac{k}{2(d+z'_i)}(X-x'_i)^2$$

[0034]

[0035] 여기서, A'_i는 광변조부(400)가 없을 때 A_i의 이미지가 맺히는 위치이며,

$$A'_i = (x'_i, z'_i) = (-Mx_i, 2L+M^2 z_i)$$

[0036]

[0037] 로 나타낼 수 있다. 여기서, $x'_i = -Mx_i$는 렌즈에 의한 위상중심(phase center)을 나타낸다.

[0038] 한편, 3차원큐빗모델에서 i번째 원자의 위치가 (x_{-i}, y_{-i}, z_{-i})이고 이에 대응하는 광변조부상의 위치가 (X_i, Y_i)로 저장된다면 광변조부에서는 (X_i, Y_i)에 해당하는 위치에 대하여 아래와 같이 위상을 변조시킬 수 있다.

$$\Phi_{SLM}(X) = \sum_i \frac{k}{2f_i^F}(X-x'_i)$$

[0039]

[0040] X는 $|X-X^c| < D_i/2$ 의 범위에서 정의되며, 강도중심(intensity center) X_i^c 는

$$X^C = f(x_i, z_i) = -Mx_i - \left(\frac{Mz_i + d/M}{f_1 - z_i}\right)x_i$$

[0041]

[0042] 로 계산된다. 상기 강도중심(intensity center)은 광변조부가 생성하는 프로그램된 프레넬렌즈의 중심으로서 QIP에서 주광선(chief ray)의 좌표가 된다.

$$f_i^F = \frac{d(d+z'_i)}{z'_i}$$

[0043] 여기서, k는 파수벡터(wave vector)의 크기, 는 프레넬 초점거리이며, M = f2/f1이다.

[0044] 또한, D_i는 QIP에서 프레넬 렌즈효과가 적용되는 큐빗형광빔의 크기(지름)로서 아래와 같이 계산될 수 있다.

$$D_i = \frac{2|d+M^2 z_i|NA}{M}$$

[0045]

[0046] 여기서, NA는 렌즈의 개구수(Numerical Aperture)이다. 본 실시예에서 NA는 제1렌즈의 특성값으로 적용될 수 있다.

[0047] 도 4b는 광변조부에 의한 홀로그램 이미지를 나타내는 예시도이다.

[0048] 상기한 바와 같이 광변조부(400)상에는 각 원자의 위치에 대응되는 위치마다 미리 설정된 위상 및 방향으로 변조되므로 초점거리가 변경되어 촬상부(600)에 정확하게 이미징될 수 있다.(파란색 부분)

[0049] 상황에 따라 상기 제1렌즈 및 제2렌즈 사이에는 위상지연판 및 편광판이 구비될 수 있다. 예를 들어, 상기 제1

렌즈(210)를 통과한 큐빗형광빔은 반파장판(Half Wave Plate)을 통과하면서 편광방향이 변경될 수 있으며, 상기 반파장판 바로 뒤에 배치된 편광판에 의해 미리 설정된 편광을 가진 큐빗형광빔만 통과시킬 수 있다. 상기 위상지연판은 QWP(quarter Wave Plate)이 사용될 수도 있다. 다만, 이때에는 QWP에 맞게 편광판도 변경되는 것이 바람직하다.

[0050] 상기 위상지연판 및 편광판은 광변조부(400)의 종류 및 특성에 따라 구비될 수 있으며, 경우에 따라 아예 필요 없을 수도 있다.

[0051] 상기 광변조부(400)를 통과한 큐빗형광빔은 제3렌즈(230)를 통과하면서 다시 집광되어 촬상부(600)로 입사된다.

[0052] 상기 촬상부(600)는 FIP(Final image plane)상에 위치할 수 있으며, EMCCD(Electron Multiplying CCD)로 구비될 수 있다. 또한, 상기 EMCCD는 전하의 축적과 전송을 이용한 기록소자로서, 홀로그램 이미지를 캡처하는 기능을 갖는 것이 바람직하다.

[0053] 도 4c는 광변조부(400)가 없을 때 촬상부(600)에 의해 이미징된 화면을 나타내고, 도 4d는 광변조부에 의해 3차원 홀로그래픽 변조된 이미지를 나타낸다. 도 4c 및 도 4d를 비교하여 보면, 도 5c는 z의 위치가 다른 원자의 이미지가 제대로 나타나지 않는 반면, 도 5d는 3차원으로 배열된 원자의 이미지가 2차원평면상에 정확히 이미징된 것을 알 수 있다.

[0054] 다음으로, 도 5a 내지 도 5e를 참조하면, z축방향으로 +d, 0, -d만큼 떨어져 있으며, x축방향으로 미세하게 위치한 원자에 대해 본 발명에 의한 3차원 홀로그래픽 이미지 생성장치를 이용하여 이미지를 생성하는 실험을 하였다. 세 원자의 위치는 각각 A1=(ε,-d), A2=(ε,0), A3=(ε,+d)로 표시할 수 있다.

[0055] 도 5b는 선형위상보정이 없는 상태의 광변조부에 의한 위상보정을 나타내며, 이 경우 도 5c와 같이 FIP에서 세개의 원자가 겹쳐서 이미징되므로 원자를 구별하기가 어려워진다.

[0056] 한편, 도 5d는 선형위상보정을 추가하였을 때 광변조부에 의한 홀로그래픽 변조방식을 나타내며, 이 경우 도 5e와 같이 FIP에서 세개의 원자는 각각 분리된 위치에 이미징됨을 알 수 있다.

[0057] 구체적으로, 광변조부에서는 세 원자마다 각각 $\Phi_{SLM}(X)$ 에 선형위상 $\phi_i^L = k_{Li}X$ 을 추가하여 주며, 이러한 선형위상보정을 하여줌으로써 도 5d와 같이 프레즈넬렌즈의 중심을 옮기는 것과 같은 효과가 발생한다. 즉, 광변조부에서는 기본적으로 아래와 같이 이차위상을 생성시키고,

[0058]
$$\exp\left(ik\frac{x^2+y^2}{2f}\right)$$

[0059] 여기에 추가적으로 아래와 같이 선형위상보정을 해줌으로써 촬상부에서 원하는 위치로 매핑할 수 있게 된다. 이렇게 함으로써 겹쳐진 원자의 위치를 분리하여 확실하게 이미징할 수 있게 된다.

[0060]
$$\exp\left(ik\frac{x^2+y^2}{2f}\right)\times\exp(ikL_ix) = \exp\left(ik\frac{(x-x_0)^2+y^2}{2f}\right)$$

[0061] 또한, 상기 선형위상에서 k_{Li}를 적절히 조절해 줌으로써 각각의 위상중심과 강도중심을 일치시켜 줄 수 있다.

[0062] 다음으로, 도 6을 참조하여 본 발명에 의한 3차원 홀로그래픽 이미지생성방법에 대하여 설명한다.

[0063] 먼저, 준비단계로서 3차원큐빗모델이 생성된다. 상기 3차원큐빗모델은 미리 설정된 위치에 원자들이 생성된 것으로서, 원자냉각 및 원자포획과정단계를 거칠 수 있다.

[0064] 즉, 원자냉각단계에서는 MOT(Magneto Optical Trap), Polarization Gradient Cooling 등의 방법이 사용될 수 있으며, 광학핀셋(Opical tweezer)을 이용하여 원자를 원하는 위치에 배열할 수 있다.

[0065] 3차원큐빗모델이 생성되면 원자들을 리드버그상태로 여기시켜 큐빗 상태를 원하는 상태로 바꿔주고, 이 상태에서 큐빗형광빔을 방출한다. 각 원자에서 방출된 큐빗형광빔은 렌즈부를 거쳐 경로가 변경되며, 중간에 위치한 광변조부에 의해 각 원자에 대응되는 위치에서 위상변조가 발생되어 새로운 홀로그램이 생성된다.

[0066] 이렇게 변조된 홀로그램 이미지는 촬상부로 입사하여 촬상부에 의해 이미지가 생성된다.

[0067] 리드버그 양자시뮬레이터에서는 다음 연산을 위한 새로운 3차원큐빗모델이 생성될 수 있으며, 상기한 방법으로 반복적인 연산이 가능하다.

[0068] 상기에서는 본 발명의 실시예들을 참조하여 설명하였지만, 해당 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 하기의 특허 청구범위에 기재된 본 발명의 사상 및 영역으로부터 벗어나지 않는 범위 내에서 본 발명을 다양하게 수정 및 변경시킬 수 있음을 이해할 수 있을 것이다.

부호의 설명

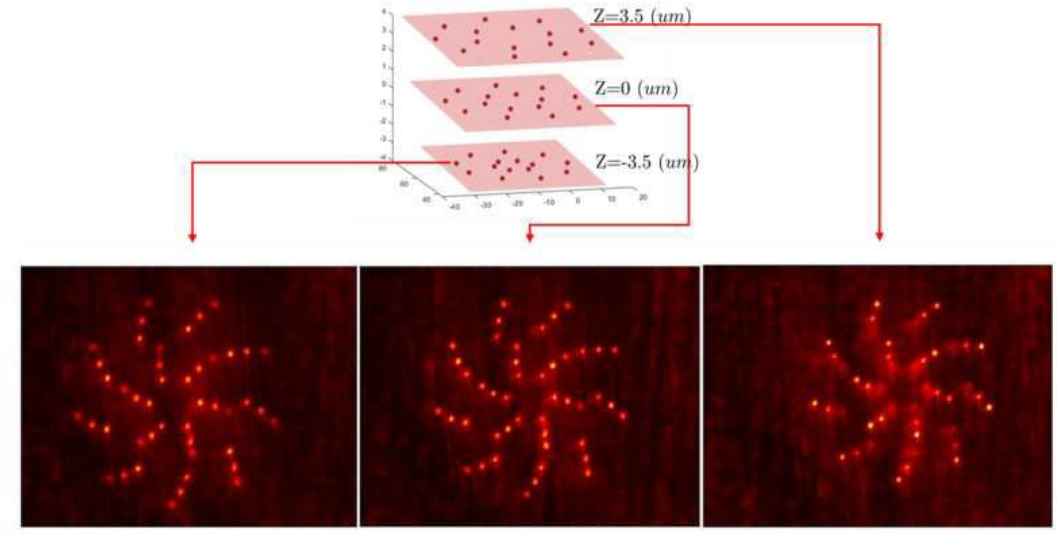
[0069] 100 : 형광부 210 : 제1렌즈

220 : 제2렌즈 230 : 제3렌즈

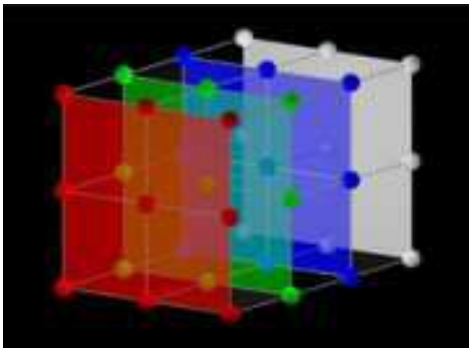
400 : 광변조부 600 : 촬상부

도면

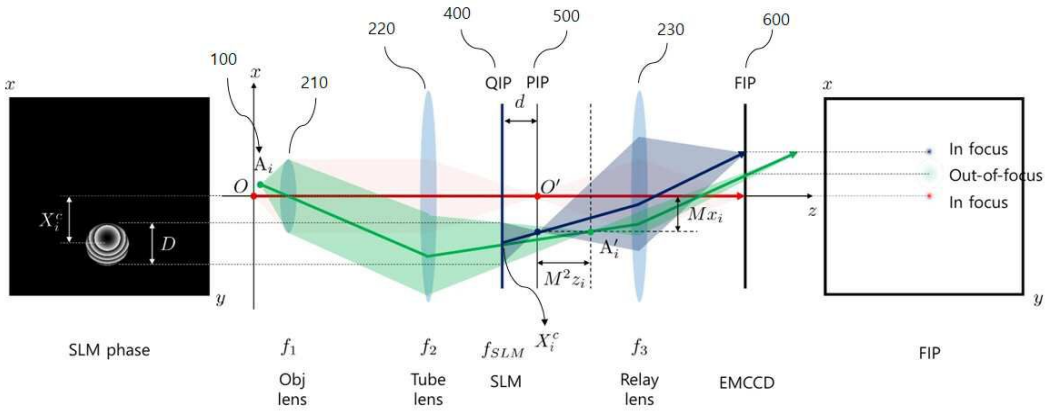
도면1



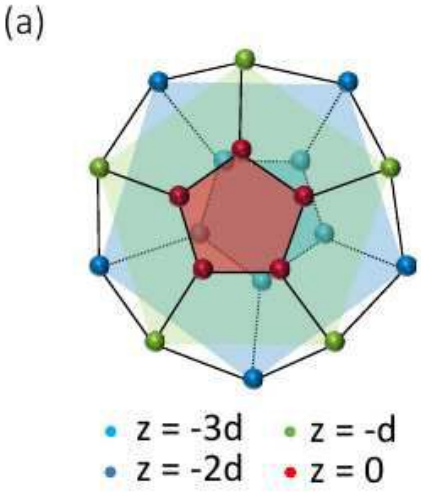
도면2



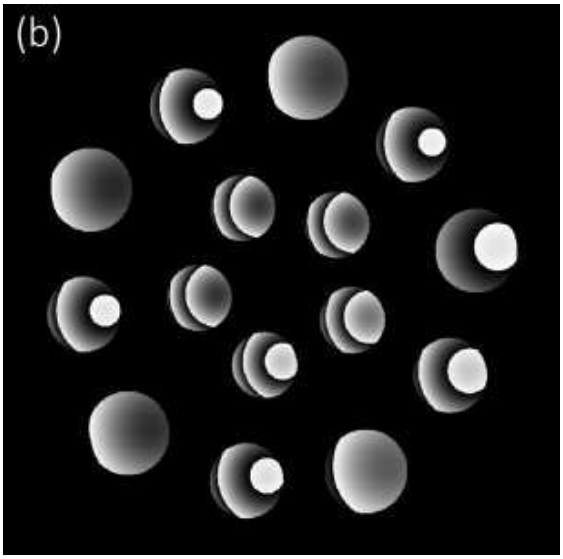
도면3



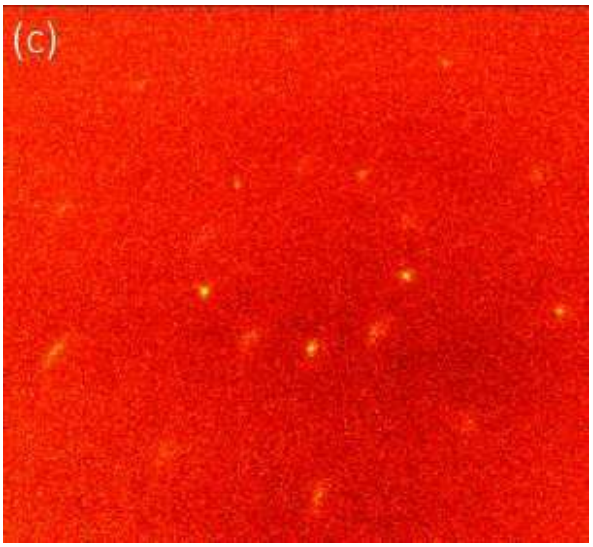
도면4a



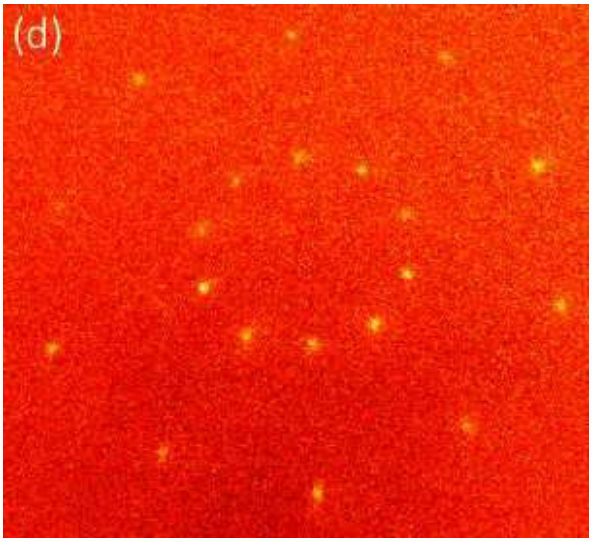
도면4b



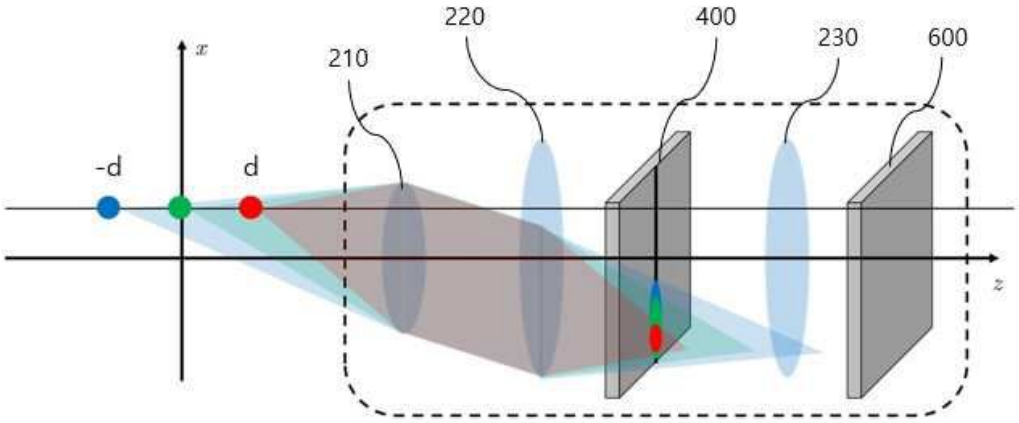
도면4c



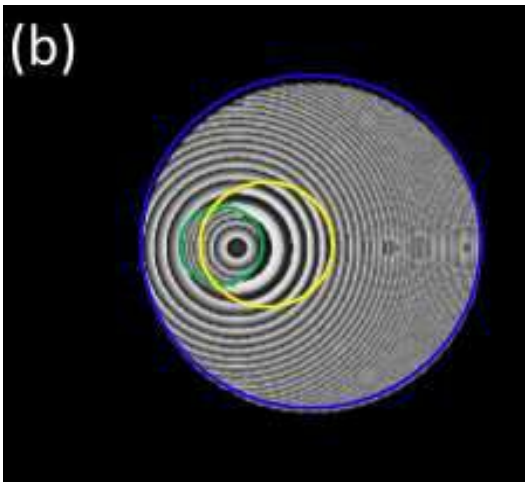
도면4d



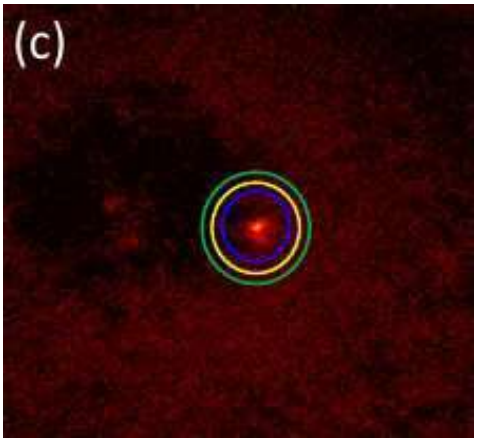
도면5a



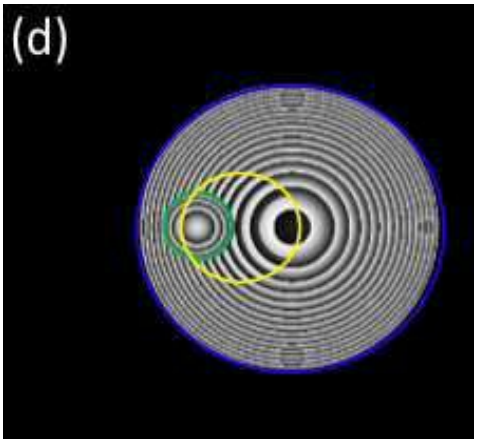
도면5b



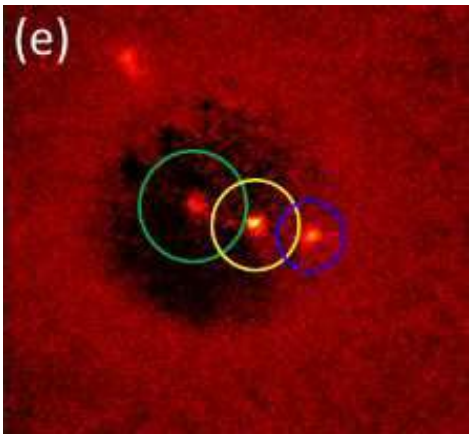
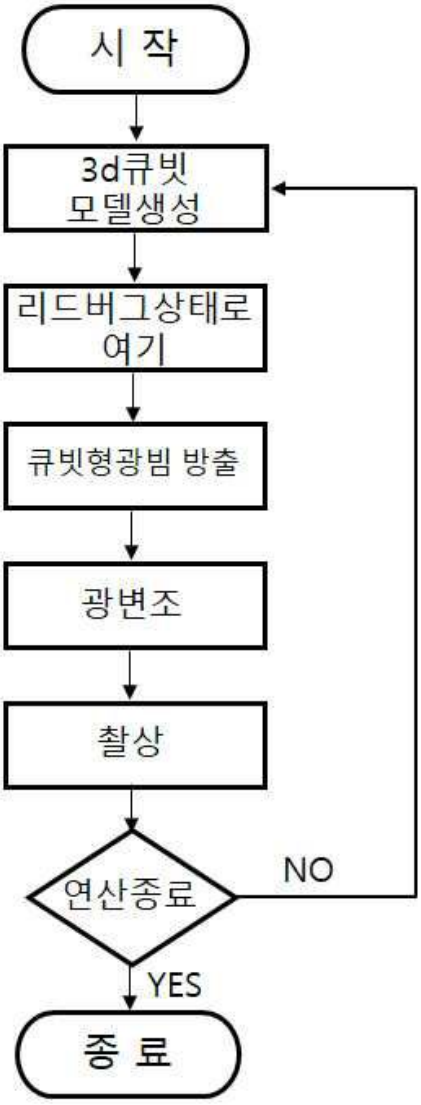
도면5c



도면5d



도면5e



도면6