

(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2021-0003180

(43) 공개일자 2021년01월11일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

G01N 15/02 (2006.01) G01N 15/00 (2017.01)

G01N 15/10 (2006.01) G01N 15/14 (2006.01)

H01S 5/068 (2006.01) H01S 5/42 (2006.01)

(52) CPC특허분류

G01N 15/0227 (2013.01)

G01N 15/1434 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2020-7033209

(22) 출원일자(국제) 2019년04월23일

심사청구일자 없음

(85) 번역문제출일자 2020년11월18일

(86) 국제출원번호 PCT/US2019/028781

(87) 국제공개번호 WO 2019/209866

국제공개일자 2019년10월31일

(30) 우선권주장

15/959,717 2018년04월23일 미국(US)

(71) 출원인

아티움 테크놀로지스, 인코포레이티드

미국 94085 캘리포니아주 서니베일 유닛 씨 레이
크사이드 드라이브 470

(72) 발명자

바찰로, 윌리엄 디.

미국 94022 캘리포니아주 로스 알토스 헬스 살타
몬테스 웨이 14660

페인, 그레고리 에이.

미국 99352 워싱턴주 리치랜드 패티톤 레인 1096
(뒷면에 계속)

(74) 대리인

양영준, 임규빈, 백만기

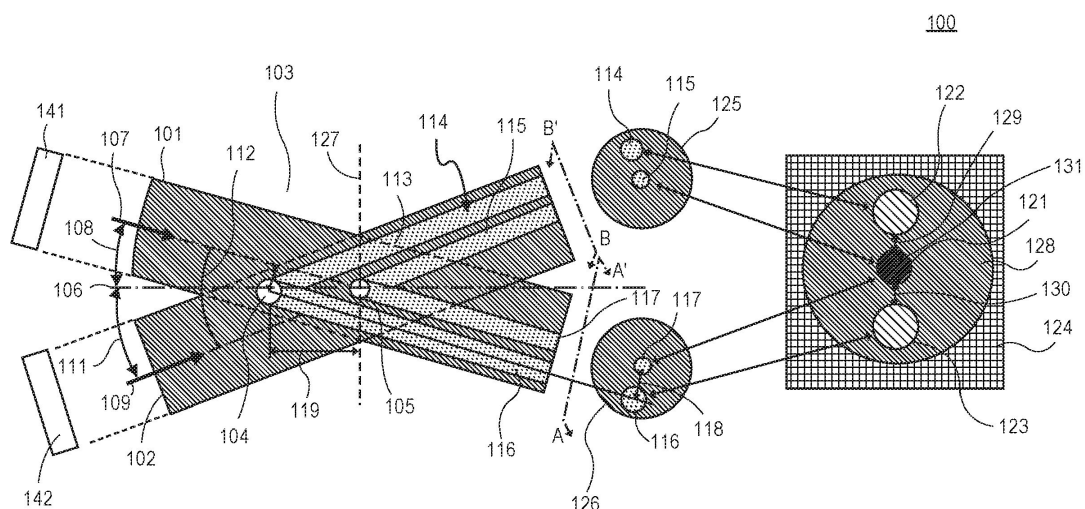
전체 청구항 수 : 총 26 항

(54) 발명의 명칭 수렴 다중-빔 조명을 위해 VCSEL 레이저들을 사용한 입자 필드 이미징 및 특성화

(57) 요약

입자들의 다중-빔 이미징을 제공하는 장치는 입자 필드 내에 측정 볼륨을 형성하기 위해 서로 수렴하는 복수의 광 빔을 생성하도록 구성된 복수의 수직 공동 표면 방출 레이저(VCSEL)를 포함한다. 복수의 VCSEL은 측정 볼륨의 배경 조명에 균일성을 제공하도록 구성된다. 이미징 광학기기는 복수의 VCSEL 중 적어도 하나에 결합된다. 디지털 카메라는 디지털 카메라의 초점면에서 측정 볼륨을 통과하는 입자의 그림자 이미지를 획득하기 위해 이미징 광학기기에 결합된다. 프로세서는 디지털 카메라에 결합된다.

대표도



(52) CPC특허분류

G01N 15/1459 (2013.01)

H01S 5/06804 (2013.01)

H01S 5/423 (2013.01)

G01N 2015/0011 (2013.01)

G01N 2015/0026 (2013.01)

G01N 2015/0046 (2013.01)

G01N 2015/0053 (2013.01)

G01N 2015/1075 (2013.01)

G01N 2015/145 (2013.01)

(72) 발명자

이브라힘, 칼리드

미국 19440 펜실베이니아주 해트필드 키스톤 درا

이브 2219

피드리히, 마이클 제이.

미국 95130 캘리포니아주 산호세 빌라노바 로드

2440

마닌, 줄리엔

미국 94551 캘리포니아주 리버모어 로즈 게이트 커

몬스 1775

명세서

청구범위

청구항 1

다중-빔 이미징을 제공하는 장치로서,

입자 필드 내에 측정 볼륨을 형성하기 위해 서로 수렴하는 복수의 광 빔을 상기 측정 볼륨과 연관된 배경 조명에 균일성을 제공하도록 생성하는 복수의 수직 공동 표면 방출 레이저(vertical cavity surface emitting laser);

상기 복수의 수직 공동 표면 방출 레이저 중 적어도 하나에 결합된 이미징 광학기기; 및

제1 디지털 카메라의 초점면에서 상기 측정 볼륨을 통과하는 제1 입자의 제1 그림자 이미지를 획득하기 위해 상기 이미징 광학기기에 결합된 상기 제1 디지털 카메라; 및

상기 제1 디지털 카메라에 결합된 프로세서

를 포함하는, 장치.

청구항 2

제1항에 있어서, 상기 제1 그림자 이미지와 상기 배경 조명 사이의 콘트라스트(contrast)는 상기 초점면 외부의 제2 입자의 제2 그림자 이미지와 상기 배경 조명 사이의 콘트라스트보다 큰, 장치.

청구항 3

제1항에 있어서, 상기 복수의 광 빔 각각은 적어도 2 개의 수직 공동 표면 방출 레이저에 의해 생성되는, 장치.

청구항 4

제1항에 있어서, 상기 복수의 수직 공동 표면 방출 레이저는 적어도 6 개의 수직 공동 표면 방출 레이저를 포함하는, 장치.

청구항 5

제1항에 있어서, 상기 복수의 수직 공동 표면 방출 레이저는 동일한 파장을 생성하도록 구성되는, 장치.

청구항 6

제1항에 있어서, 상기 복수의 광 빔 각각은 7 도 이하의 빔 발산 각도를 갖는, 장치.

청구항 7

제1항에 있어서, 상기 복수의 수직 공동 표면 방출 레이저의 출력 전력은 적어도 750 mW인, 장치.

청구항 8

제1항에 있어서, 상기 프로세서는 상기 배경 조명을 모니터링하도록 구성되고, 상기 프로세서는 상기 제1 그림자 이미지를 획득하기 위해 모니터링된 배경 조명에 기반하여 상기 복수의 수직 공동 표면 방출 레이저 중 적어도 하나의 수직 공동 표면 방출 레이저의 강도를 조정하도록 구성되는, 장치.

청구항 9

제1항에 있어서, 상기 프로세서는 상기 배경 조명으로부터 상기 제1 그림자 이미지를 결정하도록 구성되고, 상기 프로세서는 상기 제1 그림자 이미지에 기반하여 상기 제1 입자를 식별하도록 구성되고, 상기 프로세서는 상기 제1 그림자 이미지에 기반하여 식별된 제1 입자의 크기를 결정하도록 구성되는, 장치.

청구항 10

제1항에 있어서, 상기 복수의 수직 공동 표면 방출 레이저 중 적어도 하나는 펄스 빔을 생성하도록 구성되는, 장치.

청구항 11

제1항에 있어서, 상기 배경 조명은 스펙클들 및 회절 패턴들이 없는, 장치.

청구항 12

제1항에 있어서, 상기 복수의 수직 공동 표면 방출 레이저 중 적어도 일부는 수직 공동 표면 방출 레이저 어레이의 일부인, 장치.

청구항 13

제1항에 있어서, 상기 복수의 수직 공동 표면 방출 레이저 중 적어도 일부는 원형 패턴으로 배열되는, 장치.

청구항 14

입자들의 다중-빔 이미징을 제공하는 방법으로서,

복수의 수직 공동 표면 방출 레이저를 사용하여 입자 필드 내에 측정 볼륨을 형성하기 위해 서로 수렴하는 복수의 광 빔을 상기 측정 볼륨의 배경 조명에 균일성을 제공하도록 생성하는 단계; 및

제1 디지털 카메라의 초점면에서 상기 측정 볼륨을 통과하는 제1 입자의 제1 그림자 이미지를 획득하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 15

제14항에 있어서,

상기 초점면 외부에 있는 제2 입자의 제2 그림자 이미지를 생성하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 16

제14항에 있어서,

상기 제1 그림자 이미지와 상기 배경 조명 사이의 콘트라스트를 결정하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 17

제14항에 있어서, 상기 복수의 광 빔 각각은 적어도 2 개의 수직 공동 표면 방출 레이저에 의해 생성되는, 방법.

청구항 18

제14항에 있어서, 상기 복수의 수직 공동 표면 방출 레이저는 동일한 파장을 생성하도록 구성되는, 방법.

청구항 19

제14항에 있어서,

상기 배경 조명을 모니터링하는 단계; 및

상기 제1 그림자 이미지를 획득하기 위해 모니터링된 배경 조명에 기반하여 상기 복수의 수직 공동 표면 방출 레이저 중 적어도 하나를 조정하는 단계

를 더 포함하는, 방법.

청구항 20

제14항에 있어서,

상기 배경 조명으로부터 상기 제1 그림자 이미지를 결정하는 단계;

상기 제1 그림자 이미지에 기반하여 상기 제1 입자를 식별하는 단계; 및
상기 제1 그림자 이미지에 기반하여 식별된 제1 입자의 크기를 결정하는 단계
를 더 포함하는, 방법.

청구항 21

비일시적 머신 판독가능 매체로서,

데이터 프로세싱 시스템에 의해 액세스될 때, 상기 데이터 프로세싱 시스템으로 하여금:

복수의 수직 공동 표면 방출 레이저를 사용하여 입자 필드 내에 측정 볼륨을 형성하기 위해 서로 수렴하는 복수의 광 빔을 상기 측정 볼륨의 배경 조명에 균일성을 제공하도록 생성하는 단계; 및

제1 디지털 카메라의 초점면에서 상기 측정 볼륨을 통과하는 제1 입자의 제1 그림자 이미지를 획득하는 단계를 포함하는 입자들을 이미징하는 방법을 수행하게 하는 데이터를 포함하는, 비일시적 머신 판독가능 매체.

청구항 22

제21항에 있어서, 상기 데이터 프로세싱 시스템으로 하여금:

상기 초점면 외부에 있는 제2 입자의 제2 그림자 이미지를 생성하는 것을 포함하는 동작들을 수행하게 하는 명령들을 더 포함하는, 비일시적 머신 판독가능 매체.

청구항 23

제21항에 있어서, 상기 데이터 프로세싱 시스템으로 하여금:

상기 제1 그림자 이미지와 상기 배경 조명 사이의 콘트라스트를 결정하는 것을 포함하는 동작들을 수행하게 하는 명령들을 더 포함하는, 비일시적 머신 판독가능 매체.

청구항 24

제21항에 있어서, 상기 복수의 광 빔 각각은 적어도 2 개의 수직 공동 표면 방출 레이저에 의해 생성되는, 비일시적 머신 판독가능 매체.

청구항 25

제21항에 있어서, 상기 데이터 프로세싱 시스템으로 하여금:

상기 배경 조명을 모니터링하는 것; 및

상기 제1 그림자 이미지를 획득하기 위해 모니터링된 배경 조명에 기반하여 상기 복수의 수직 공동 표면 방출 레이저 중 적어도 하나의 수직 공동 표면 방출 레이저의 강도를 조정하는 것

을 포함하는 동작들을 수행하게 하는 명령들을 더 포함하는, 비일시적 머신 판독가능 매체.

청구항 26

제21항에 있어서, 상기 데이터 프로세싱 시스템으로 하여금:

상기 배경 조명으로부터 상기 제1 그림자 이미지를 결정하는 것;

상기 제1 그림자 이미지에 기반하여 상기 제1 입자를 식별하는 것; 및

상기 제1 그림자 이미지에 기반하여 식별된 제1 입자의 크기를 결정하는 것

을 포함하는 동작들을 수행하게 하는 명령들을 더 포함하는, 비일시적 머신 판독가능 매체.

발명의 설명

기술 분야

본 출원은 2015년 2월 20일에 출원된 미국 가출원 번호 62/118,962호로부터 우선권의 이익을 주장하는, 발명의

명칭이 MULTIPLE BEAM AND CONVERGENT LIGHT ILLUMINATION CROSSED-BEAM IMAGING인 2016년 2월 17일에 출원된 국제 출원 번호 PCT/US2016/018352의 35 U.S.C. § 371 하의 미국 국제 단계 출원인 2017년 8월 18일에 출원된 미국 특허 출원 S/No. 15/552,263호에 관한 것이다.

[0002] 본 발명은 미국 항공 우주국(NASA)이 수여한 계약 번호 NNX14CC65P에 따라 정부의 지원으로 만들어졌다. 정부는 본 발명에 대한 소정 권리를 갖는다.

[0003] 본 발명의 실시예들은 입자 이미징에 관한 것이다. 보다 구체적으로, 본 발명의 실시예들은 수렴 광을 사용한 입자들의 이미징에 관한 것이다.

배경 기술

[0004] 매우 광범위한 산업 공정은 불규칙한 모양들과 크기들의 액체 액적들 및 고체 입자들을 사용한다. 그라인딩 분말(grinding powder)들, 의료용 흡입기들, 및 스프레이 페인팅은 몇 가지 그런 예이다. 열 및 다른 스프레이들에 의해 생성되는 코팅들을 포함하는 산업 공정들은 통상적으로 입자 파라미터들, 예컨대 입자 크기, 모양, 속도, 및 공간에서의 포지션의 결정들을 포함한다. 항공기 착빙 영역은 얼음 결정들 및 얼음 입자들(구형 동결 액적들)의 존재 내에 과냉각된 물 액적들을 포함한다. 기존 기법들은 이런 입자들의 크기를 정확하게 신뢰성 있게 측정할 수 없다. 또한, 기존 기법들은 얼음 입자들 및 얼음 결정들로부터 액체 액적들을 분리할 수 없다.

[0005] 기존 입자 이미징 기법은 아크 플래시 램프(arc flash lamp)들, 펄스 레이저들, 및 조명용 펄스 LED들을 사용하며-시야 이미징을 통합하는 것을 포함한다. 이런 기법들은 통상적으로 전하-결합 소자("CCD") 카메라들 또는 상보성 금속 산화물 반도체("CMOS") 카메라들을 사용하여 입자들의 그림자 이미지들을 기록한다. 이런 기법들은 통상적으로 입자 필드(particle field)를 조명하기 위해 산광기와 함께 시준되거나 거의 시준된 광을 사용한다. 그러나, 이런 기법들에서, 상대적으로 조밀한 입자 필드 조건들에서 초점이 맞지 않는 입자들은 통상적으로 초점이 맞는 입자 그림자 이미지들의 검출 및 측정을 복잡하게 하는 그림자들을 생성한다. 또한, 광 빔 경로에서 더 큰 입자들은 광 빔을 없애거나 가릴 수 있고, 이는 샘플 볼륨에서 더 작은 입자 이미지의 손실을 야기할 수 있다. 그런 이미지의 손실들은 샘플링 통계에서 허용가능하지 않은 편차를 초래한다.

[0006] 통상적으로, 입자 이미징 기법들에 사용되는 레이저들은 에지 방출 레이저 다이오드들이다. 에지 방출 레이저 다이오드들은 일반적으로 웨이퍼들로부터 절단된 쪼개진 바아(bar)들로 구성된다. 공기와 반도체 재료 사이의 높은 굴절률의 결과로, 쪼개진 바아 면들은 거울들 역할을 한다. 에지 방출 레이저 다이오드들의 경우, 광은 활성층들과 평행하게 진동하고 옆으로 빠져나가 타원형 레이저 빔 프로파일을 초래한다.

[0007] 바람직하지 않게, 기존 입자 이미징 기법들에 사용되는 레이저들은 피쳐(feature)들 및 스펙클(speckle)들 주변에 가시적인 회절 링들을 생성한다. 레이저 방사선의 회절 링들 및 스펙클들은 가시선 현미경 검사에 바람직하지 않다. 레이저 방사선의 스펙클들 및 회절은 이미지 품질 및 배경 광 강도 분포를 열화시켜, 노이즈가 많고 비-균일하게 된다.

발명의 내용

[0008] 입자들의 다중-빔 이미징을 제공하는 방법들 및 장치들이 설명된다. 일 실시예에서, 입자들의 다중-빔 이미징을 제공하는 장치는 입자 필드 내에 측정 볼륨을 형성하기 위해 서로 수렴하는 복수의 광 빔을 생성하도록 구성된 복수의 수직 공동 표면 방출 레이저(VCSEL)를 포함한다. 복수의 VCSEL은 측정 볼륨의 배경 조명에 균일성을 제공하도록 구성된다. 이미징 광학기기는 복수의 VCSEL 중 적어도 하나에 결합된다. 디지털 카메라는 디지털 카메라의 초점면에서 측정 볼륨을 통과하는 입자의 그림자 이미지를 획득하기 위해 이미징 광학기기에 결합된다. 프로세서는 디지털 카메라에 결합된다.

[0009] 일 실시예에서, 입자 필드 내에 측정 볼륨을 형성하기 위해 서로 수렴하는 복수의 광 빔은 측정 볼륨의 배경 조명에 균일성을 제공하도록 복수의 수직 공동 표면 방출 레이저를 사용하여 생성된다. 디지털 카메라의 초점면에서 측정 볼륨을 통과하는 입자의 그림자 이미지가 획득된다.

[0010] 일 실시예에서, 비일시적 머신 판독가능 매체는, 데이터 프로세싱 시스템에 의해 액세스될 때, 데이터 프로세싱 시스템으로 하여금, 복수의 수직 공동 표면 방출 레이저를 사용하여 입자 필드 내에 측정 볼륨을 형성하기 위해 서로 수렴하는 복수의 광 빔을 측정 볼륨의 배경 조명에 균일성을 제공하도록 생성하는 단계, 및 제1 디지털 카메라의 초점면에서 측정 볼륨을 통과하는 이미지의 그림자 이미지를 획득하는 단계를 포함하는 입자들을 이미징하는 방법을 수행하게 하는 데이터를 포함한다.

[0011] 본 발명의 실시예들의 다른 특징들 및 장점들은 첨부 도면들 및 아래에 뒤따르는 상세한 설명으로부터 명백해질 것이다.

도면의 간단한 설명

[0012] 본 발명은, 유사한 참조들이 유사한 엘리먼트들을 나타내는 첨부 도면들의 도면들에서 제한이 아니라 예로서 예시된다.

도 1은 복수의 수직 공동 표면 방출 레이저 소스(VCSEL)를 사용하여 다중-빔 이미징을 제공하는 장치의 일 실시예의 개략도를 도시한다.

도 2는 다른 실시예에 따른 VCSEL들을 사용하여 입자들을 이미징하는 장치의 개략도를 도시한다.

도 3은 복수의 VCSEL을 사용하여 다중-빔 이미징을 제공하는 시스템의 일 실시예를 도시하는 도면이다.

도 4는 일 실시예에 따른 다중-빔 조명 시스템을 예시하는 도면이다.

도 5a는 일 실시예에 따른 다중-빔 입자 이미징 시스템의 수직 공동 표면 방출 레이저(VCSEL) 소스의 개략적인 레이아웃을 예시하는 도면이다.

도 5b는 일 실시예에 따른 VCSEL 소스에 의해 생성된 광 빔 프로파일의 예를 도시하는 도면이다.

도 5c는 이미징 시스템의 초점면으로부터 다른 거리들에서 측정 볼륨을 통과하는 입자들의 다중-빔 조명 이미징의 예들을 도시하는 도면이다.

도 6a는 일 실시예에 따른 VCSEL 어레이의 2-차원 조명 프로파일 및 LED 시스템의 2-차원 조명 프로파일을 예시하는 도면이다.

도 6b는 일 실시예에 따른 다중-빔 이미징 시스템의 VCSEL 소스의 측정된 펄스 프로파일들을 도시하는 도면이다.

도 6c는 일 실시예에 따른 스위칭 성능에 관한 VCSEL 시스템의 특성 속성들을 예시하는 표의 도면이다.

도 6d는 일 실시예에 따른 다중-빔 이미징 시스템의 VCSEL 어레이의 측정된 스펙트럼을 도시하는 도면이다.

도 7a는 일 실시예에 따른 다중-빔 이미징 시스템의 VCSEL 어레이의 방출 영역의 사진이다.

도 7b는 일 실시예에 따라 장면이 LED 소스에 의해 조명될 때 장거리 현미경에 의해 캡처된 해상도 차트 및 장면이 VCSEL 소스에 의해 조명될 때 장거리 현미경에 의해 캡처된 해상도 차트를 도시하는 도면이다.

도 8은 다중 조명 광 빔을 생성하기 위해 VCSEL 소스들을 포함하는 다중-빔 이미징 시스템의 다른 실시예를 예시하는 개략도이다.

도 9a는 일 실시예에 따른 다중-빔 이미징 장치의 VCSEL 시스템에 의해 생성된 수렴 빔들에 의해 조명된 배경(901)의 이미지를 도시하는 도면(900)이다.

도 9b는 일 실시예에 따른 다중-빔 이미징 장치의 VCSEL 조명을 사용하여 생성된 단분산 액적들의 이미지를 도시하는 도면이다.

도 9c는 다른 실시예에 따른 다중-빔 이미징 장치의 VCSEL 조명을 사용하여 생성된 단분산 액적들의 이미지를 도시하는 도면이다.

도 10은 일 실시예에 따른 다중-빔 이미징 장치의 VCSEL 조명을 사용하여 생성된 조밀한 스프레이 이미지를 도시하는 도면이다.

도 11은 일 실시예에 따른 다중-빔 다이오드 레이저들을 사용하여 조명된 회박 입자 필드의 이미지를 도시하는 도면이다.

도 12는 일 실시예에 따른 다중-빔 다이오드 레이저들을 사용하여 조명된 조밀한 입자 필드(1201)의 이미지를 도시하는 도면이다.

도 13은 입자들을 이미징하는 시스템의 다른 실시예를 도시하는 도면이다.

도 14는 일 실시예에 따른 입자들의 다중-빔 이미징을 제공하는 방법의 흐름도를 도시한다.

도 15는 다른 실시예에 따른 입자들의 다중-빔 이미징을 제공하는 방법의 흐름도를 도시한다.

도 16a는 입자들을 이미징하는 시스템의 일 실시예를 예시한다.

도 16b는 입자들을 이미징하는 시스템의 일 실시예를 예시한다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0013] 복수의 수직 공동 표면 방출 레이저를 사용하여 입자들의 다중-빔 이미징을 제공하는 방법들 및 장치들이 설명된다. "입자"라는 용어가 본원에서 액적, 기포, 또는 임의의 다른 물체를 지칭한다는 것이 주목되어야 한다. 입자는 구형, 변형된 구형, 또는 임의의 다른 모양을 가질 수 있다. 입자는 액체, 고체 물질, 기포, 또는 이들의 임의의 조합을 포함할 수 있다.
- [0014] 일 실시예에서, 입자들을 이미징하는 장치는 입자 필드를 통해 전파되는 복수의 광 빔을 생성하기 위해 복수의 수직 공동 표면 방출 레이저(VCSEL)를 포함한다. 복수의 VCSEL은 입자 필드 내에 측정 볼륨을 형성하기 위해 서로 수렴한다. 복수의 VCSEL은 측정 볼륨의 배경 조명에 균일성을 제공하도록 구성된다. 이미징 광학기기는 복수의 VCSEL 중 적어도 하나에 결합된다. 디지털 카메라는 디지털 카메라의 초점면에서 측정 볼륨을 통과하는 입자의 그림자 이미지를 획득하기 위해 이미징 광학기기에 결합된다. 프로세서는 디지털 카메라에 결합된다. VCSEL 광 소스들은 균일하고 레이저 스펙클들이 없는 고품질 조명을 제공하기 위해 입자들의 다중-빔 이미징에 사용된다. VCSEL들은 예지 방출 레이저 다이오드들에 비해 더 낮은 제조 비용들을 가지며 신뢰성이 높다. 현재, VCSEL들은 데이터 통신, 근거리 통신망 및 얼굴 인식 시스템에서만 사용된다.
- [0015] 통상적으로, 이미징 기법들을 위한 조명 소스로 사용되는 레이저 다이오드들은 레이저, 특정 특성, 예컨대 이미지 품질을 열화시키는 회절 및 스펙클들을 갖는다. 입자 다중-빔 이미징을 위한 VCSEL들 어레이의 사용은 유리하게 기존 기법들에 비해 회절 및 스펙클을 감소시키고 입자 측정 볼륨의 배경 조명의 균일성을 증가시킨다.
- [0016] 도 1은 복수의 수직 공동 표면 방출 레이저 소스(VCSEL)를 사용하여 다중-빔 이미징을 제공하는 장치(100)의 일 실시예의 개략도를 도시한다. 장치(100)는 복수의 조명 광 빔을 생성하기 위한 복수의 VCSEL(예컨대, 조명 광 빔(101)을 생성하기 위한 VCSEL 소스 및 조명 광 빔(102)을 생성하기 위한 VCSEL 소스)을 포함하며, 복수의 조명 광 빔은 서로 수렴하여 측정 볼륨(113)과 연관되는 이미징 시스템의 이미지 평면(124)상의 배경(128) 조명에 균일성을 제공하고 이미지 평면(124)에 초점이 맞지 않는 그림자들을 제거하는 입자 필드(103) 내의 측정 볼륨(113)을 형성한다. 도 1에 도시된 바와 같이, 배경(128)상의 상이한 위치에서 VCSEL 소스들의 수렴 광 빔들에 의해 생성되는 조명 광 강도는 유사하므로, 전체 배경(128)에 걸친 광 강도 분포는 균일하다. 일 실시예에서, 배경(128)의 조명은 아래에 더 상세히 설명되는 바와 같이, 실질적으로 스펙클들 및 회절 패턴들이 없다. 아래에 더 상세히 설명되는 바와 같이, 이미징 광학기기는 복수의 수직 공동 표면 방출 레이저 중 적어도 하나에 결합된다. 디지털 카메라는 아래에 더 상세히 설명되는 바와 같이, 디지털 카메라의 초점면(127)에서 측정 볼륨(113)을 통과하는 입자의 그림자 이미지를 획득하기 위해 이미징 광학기기에 결합된다. 프로세서는 아래에 더 상세히 설명되는 바와 같이, 디지털 카메라에 결합된다.
- [0017] 일 실시예에서, 복수의 수렴 광 빔(101 및 102) 각각은 적어도 2 개의 VCSEL에 의해 생성된다. 일 실시예에서, 복수의 수렴 광 빔(101 및 102)을 생성하는 VCSEL들 중 적어도 일부는 아래에 더 상세히 설명되는 바와 같이, 수직 공동 표면 방출 레이저 어레이의 일부이다. 일 실시예에서, VCSEL들의 어레이는 복수의 수렴 광 빔(101 및 102) 중 적어도 하나를 생성하도록 구성된다. 일 실시예에서, 수렴 광 빔들(101 및 102) 중 적어도 하나를 생성하도록 구성된 VCSEL들의 어레이는 적어도 6 개의 VCSEL을 포함한다. 일 실시예에서, 광 빔들(101 및 102) 중 적어도 하나는 아래에 더 상세히 설명되는 바와 같이, 원형 패턴으로 배열된 VCSEL들의 어레이에 의해 생성된다.
- [0018] 도 1에 도시된 바와 같이, 조명 광 빔(101)은 방향(107)을 따라 광학 경로상에서 전파되고 조명 광 빔(102)은 입자 필드(103)를 통해 방향(109)을 따라 광학 경로상에서 전파된다. 빔(101)의 광학 경로는 빔(102)의 광학 경로와 상이하다. 일 실시예에서, 조명 광 빔들(101 및 102)은 동일한 파장을 갖는다. 일 실시예에서, 조명 광 빔들(101 및 102)의 파장은 약 650 nm이다. 다른 실시예에서, 조명 광 빔들(101 및 102)은 상이한 파장을 갖는다. 일 실시예에서, VCSEL들에 의해 생성되는 조명 광 빔들(101 및 102) 중 적어도 하나는 펄스 빔이다. 일 실시예에서, 입자들의 다중-빔 이미징을 위해 VCSEL들에 의해 생성되는 펄스 조명 광 빔들(101 및 102) 중 적어도 하나는 아래에 더 상세히 설명되는 바와 같이, 약 200 피코초(ps)의 빠른 상승 시간을 갖는다. 일 실시예에서, 빔들은 아래에 더 상세히 설명되는 바와 같이, 입자 운동을 "동결"시키기 위해 일제히 펄스된다.

- [0019] 일 실시예에서, 측정 볼륨을 형성하기 위해 공통 지점에서 교차하는 적어도 2 개의 조명 빔이 입자들을 이미징하는 데 사용된다. 보다 구체적인 실시예에서, 입자들을 이미징하기 위한 측정 볼륨을 형성하기 위해 공통 지점에서 수렴하는 다수의 조명 광 빔은 약 2 개 내지 12 개의 범위이다.
- [0020] 일 실시예에서, 입자들의 다중-빔 이미징을 위한 VCSEL 소스들은 레이저 스펙클을 최소화하는 발광 다이오드들(LED)의 코히어런스 길이(coherence length)와 유사한 매우 짧은 코히어런스 길이를 갖도록 구성된다. 일 실시예에서, 입자들의 다중-빔 이미징을 위한 VCSEL 어레이는 약 100 밀리와트(mW) 내지 1 킬로와트(kW) 범위의 출력 전력을 갖는다. 일 실시예에서, 입자들의 다중-빔 이미징을 위한 VCSEL 어레이는 약 10 W의 출력 전력을 갖는다.
- [0021] 일 실시예에서, VCSEL들에 의해 생성된 복수의 광 빔(101 및 102) 각각은 7도 이하의 전체 빔 발산 각도를 갖는다. 일 실시예에서, VCSEL들에 의해 생성된 복수의 광 빔(101 및 102) 각각은 적어도 750 밀리와트(mW)의 전력을 갖는다. 일 실시예에서, 다중-빔 입자 이미징 시스템의 VCSEL들은 연속 동작에서 약 7 W를 출력하고 펄스 동작에서 10 W 초과 피크 전력을 출력한다.
- [0022] 일 실시예에서, VCSEL 어레이 칩들은 조명 장치로 사용되는 종래의 LED들을 실리콘 CCD 또는 CMOS 카메라들로 대체하도록 구성된다. LED들에 비해 VCSEL들의 장점은, VCSEL 빔의 발산 각도가 LED 빔의 발산 각도보다 실질적으로 더 작다는 것이다. 일 실시예에서, VCSEL 빔의 전체 발산 각도는 단지 약 16 도이다. 일 실시예에서, VCSEL 빔의 전체 발산 각도는 약 5 도이며, 이는 모듈식 초분광 이미징(HSI)과 같은 장거리 애플리케이션들에 이상적이다.
- [0023] 일 실시예에서, 입자들의 다중-빔 이미징에 사용되는 하나 이상의 VCSEL 소스의 스펙클은 기존 시스템들과 비교하여 배경 조명의 균일성을 증가시키기 위해 1 % 미만이다. 일 실시예에서, 입자들의 다중-빔 이미징을 위해 VCSEL들에 의해 생성된 다중 광 빔에 의해 제공되는 배경 조명은 실질적으로 스펙클들 및 회절 패턴들이 없다.
- [0024] VCSEL들은, 특히 빔들을 추가로 균질화하기 위해 산광기들과 함께 사용되면, 입자들의 다중-빔 이미징을 위해 예지 방출 레이저들보다 눈에 더 안전하다. 추가 장점은, VCSEL 디바이스들이 예지 방출 레이저들보다 훨씬 더 강력하고 강렬한 시준 광 빔들을 갖는다는 것이다. VCSEL 디바이스들이 매우 높은 강도 광 빔들을 생성하지만, 광 빔들의 특성은 레이저보다 LED 라인들을 따라 더 많다. 일 실시예에서, 입자들의 다중-빔 이미징에 사용되는 VCSEL 소스는 유리하게 장착의 용이성과 소형화를 제공하는 간단한 실리카 집적 회로(IC) 칩 같은 구성으로 배열된다.
- [0025] VCSEL 디바이스들은 상대적으로 높은 온도들에서 동작할 능력을 포함하여 예지 방출 레이저 다이오드들에 비해 다수의 장점을 가져서, 냉각 시스템들이 필요하지 않다. 항공기 착빙 애플리케이션들에서, VCSEL은 프로브 히터(probe heater)들에 가까운 환경에 있을 수 있으므로 온도 무감각이 중요하다. VCSEL들은 약 $1200\text{W}/\text{cm}^2$ 에 이르는 단위 면적당 매우 높은 전력을 전달할 수 있다. VCSEL들은 가우스 강도 분포를 갖도록 설계될 수 있는 원형 빔을 방출한다. 이것은 예컨대 회절 광학 엘리먼트(DOE)들을 사용하여 빔을 거의 톱 헛 강도 분포(near top hat intensity distribution)로 변환하는 데 필요한 광학기기를 단순화한다. VCSEL 레이저들은 예지 방출 레이저 다이오드들보다 더 신뢰성이 있다. 통상적인 고장들은 10 억 디바이스 시간으로 예측된다(추정 평균 고장 시간(MTTF)은 약 100 년임). 가격 측면에서, VCSEL들은 LED 가격에 근접하고 있다. VCSEL들은, 더 높은 전력이 필요할 때 모놀리식 2D 어레이들로 쉽게 프로세싱될 수 있다.
- [0026] 다른 실시예에서, 입자들의 수렴 다중-빔 조명을 위한 조명 광 빔들은 복수의 수직 공동 표면 방출 레이저(VCSEL), 발광 다이오드("LED"), 다른 레이저, 또는 이들의 임의의 조합에 의해 생성된다.
- [0027] 도 1에 도시된 바와 같이, 입자 필드(103)는 입자(104 및 105)와 같은 입자들을 포함한다. 조명 광 빔(101)과 조명 광 빔(102)은 서로 수렴하여 측정 볼륨(113)을 형성한다. 도 1에 도시된 바와 같이, 측정 볼륨(113)은, 광 빔들(101 및 102)이 서로 겹치는 영역이다. 빔(101)은 광학 축(106)에 대해 각도(108)에 있다. 빔(102)은 광학 축(106)에 대해 각도(111)에 있다. 일 실시예에서, 각도들(108 및 111) 중 하나가 0도 각도이면, 각도들(108 및 111) 중 다른 하나는 0도 이외의 임의의 각도일 수 있다. 일 실시예에서, 빔 교차 각도는 이미징 시스템의 f-번호(f#)에 의해 결정된다. 일반적으로 f#은 렌즈 초점 길이를 렌즈 직경으로 나눈 것으로 정의된다. 다른 실시예에서, 각각의 빔은 별개의 렌즈에 의해 검출되고 이미지는 공통 이미지 평면으로 전달되어 더 큰 빔 교차 각도들이 사용될 수 있다.
- [0028] 도 1에 도시된 바와 같이, 조명 광 빔들(101 및 102)은 각도(112)로 교차한다. 일 실시예에서, 각도(112)는 각도들(108 및 111)의 합이다. 입자(105)는 디지털 카메라를 포함하는 이미징 시스템의 초점면(127)에서 측정 볼

를(113)의 일부를 통과하고 빔(102)의 방향(109)을 따라 개별 그림자(115) 및 빔(101)의 방향(107)을 따라 개별 그림자(117)를 생성한다. 입자(104)는 초점면(127)으로부터 떨어진 거리(119)에서 측정 볼륨(113)의 일부를 통과하고 빔(102)의 방향(109)을 따라 개별 그림자(114)를 생성하고 빔(101)의 방향(107)을 따라 개별 그림자(116)를 생성한다.

[0029] 방향(107)에 수직인 축(A-A')을 따른 측정 볼륨(113)의 단면도(126)는 개별 그림자들(116 및 117)을 포함한다. 방향(109)에 수직인 축(B-B')을 따른 측정 볼륨(113)의 단면도(125)는 도 1에 도시된 바와 같이, 개별 그림자들(114 및 115)을 포함한다. 입자(105)의 그림자 이미지(121)는 이미징 시스템의 이미지 평면(124)상에 형성된다. 그림자 이미지(121)는 개별 그림자들(115, 117)의 중첩으로 형성된다. 도 1에 도시된 바와 같이, 그림자 이미지(121)는 빔들(102 및 101)에 의해 생성된 배경(128)과 실질적으로 상이하다. 개별 그림자 이미지(122)는 개별 그림자(114)로부터 형성되고 개별 그림자 이미지(123)는 이미지 평면(124)상의 개별 그림자(116)로부터 형성된다. 입자(104)의 개별 그림자 이미지들(122 및 123)은 겹치지 않고 서로 분리되고 이미지 평면(124)상의 그림자 이미지(121)로부터 분리된다. 일 실시예에서, 그림자 이미지(121)와 배경(128) 사이의 콘트라스트는 초점면(127) 외부에 있는 입자(104)의 그림자 이미지(122)와 배경(128) 사이의 콘트라스트보다 크다. 일 실시예에서, 입자(104)의 개별 그림자 이미지들(122 및 123)의 조명 강도들은 배경(128)의 조명 강도들과 실질적으로 동일하다.

[0030] 일 실시예에서, 배경(128)의 조명 강도가 모니터링되고, 복수의 VCSEL 중 적어도 하나의 VCSEL의 강도가 그림자 이미지(121)를 획득하기 위해 모니터링된 배경 조명에 기반하여 조정된다. 일 실시예에서, 그림자 이미지(121)와 배경(128) 사이의 콘트라스트가 측정된다. 일 실시예에서, 측정된 콘트라스트가 미리 결정된 콘트라스트보다 크기가 결정된다. 측정된 콘트라스트가 미리 결정된 콘트라스트보다 크면, 배경(128)에서 그림자 이미지(121)가 검출된다. 콘트라스트가 미리 결정된 콘트라스트보다 크지 않으면, 배경(128)에서 그림자 이미지(121)가 검출되지 않는다. 검출된 그림자 이미지(121)에 기반하여 입자(105)가 식별된다. 식별된 입자(105)의 크기는 아래에 더 상세히 설명되는 바와 같이, 그림자 이미지(121)로부터 결정된다.

[0031] 일 실시예에서, 그림자 이미지(121)로부터 개별 그림자 이미지들(122 및 123) 각각의 변위 거리는, 초점면 외부의 입자들의 그림자들이 카메라의 이미지 평면에서 변위되고 깊은 그림자들을 형성하지 않을 것임을 나타낸다. 이미지 평면에서의 변위 거리는 샘플 볼륨의 초점면으로부터 입자들의 거리를 추정하는 데 사용될 수 있다. 이 정보는, 입자가 정확한 크기를 정하기에 충분한 초점에 있는지 결정하는 데 사용할 수 있다. 예컨대, 개별 그림자 이미지들(122 및 123) 사이의 변위 거리(131)가 결정된다. 예컨대, 이미지 평면(124)상의 개별 그림자 이미지(122)와 그림자 이미지(121) 사이의 변위 거리(129)가 결정된다. 예컨대, 이미지 평면(124)상의 개별 그림자 이미지(123)와 그림자 이미지(121) 사이의 변위 거리(130)가 결정된다. 일 실시예에서, 그림자 이미지(121)의 초점은 입자의 타입을 결정하기 위해 거리들(129 및 130)에 기반하여 평가된다.

[0032] 일 실시예에서, 입자의 타입은 입자 상태 - 예컨대, 액체, 고체, 액체 또는 고체의 기포, 또는 이들의 임의의 조합을 포함한다. 다른 실시예에서, 입자의 타입은 입자 모양, 예컨대 구형, 타원형, 다면 모양 - 예컨대 삼각형, 직사각형, 정사각형, 다이아몬드, 마름모, 다른 다면 모양, 또는 임의의 다른 입자 모양을 나타낸다. 일 실시예에서, 입자 정보는 입자의 타입에 기반하여 결정된다. 일 실시예에서, 입자 정보는 입자 속도, 입자 크기, 또는 임의의 다른 입자 정보를 포함한다. 일 실시예에서, 입자의 크기는 적어도 0.1 미크론("μm")이다. 일 실시예에서, 입자의 크기는 5 미크론("μm") 미만이다. 또 다른 실시예에서, 입자의 크기는 약 5 μm 내지 약 3000 μm의 범위에 있다. 일 실시예에서, 복수의 조명 광 빔은 아래에 더 상세히 설명되는 바와 같이, 디지털 카메라와 동기화된다.

[0033] 도 2는 다른 실시예에 따른 VCSEL들을 사용하여 입자들을 이미징하는 장치(200)의 개략도를 도시한다. 장치(200)는 복수의 조명 광 빔을 생성하기 위한 복수의 VCSEL(예컨대, 조명 광 빔들(201, 202, 203, 204, 및 205)을 생성하기 위한 VCSEL 소스들)을 포함하며, 복수의 조명 광 빔은 서로 수렴하여 측정 볼륨(228)과 연관되는 이미징 시스템의 이미지 평면(227)상의 배경(231) 조명에 균일성을 제공하고 이미지 평면(227)에 초점이 맞지 않는 그림자들을 제거하는 입자 필드 내의 측정 볼륨(228)을 형성한다. 도 2에 도시된 바와 같이, 배경(231)상의 모든 위치에서 VCSEL 소스들의 수렴 광 빔들에 의해 생성되는 조명 광 강도는 유사하므로, 전체 배경(231)에 걸친 광 강도 분포는 균일하다. 일 실시예에서, 배경(231)의 조명은 아래에 더 상세히 설명되는 바와 같이, 실질적으로 스펙클들 및 회절 패턴들이 없다. 아래에 더 상세히 설명되는 바와 같이, 이미징 광학기기는 복수의 수직 공동 표면 방출 레이저 중 적어도 하나에 결합된다. 디지털 카메라는 아래에 더 상세히 설명되는 바와 같이, 디지털 카메라의 초점면(226)에서 측정 볼륨(228)을 통과하는 입자의 그림자 이미지를 획득하기 위해 이미

정 광학기기에 결합된다. 프로세서는 아래에 더 상세히 설명되는 바와 같이, 디지털 카메라에 결합된다.

[0034] 일 실시예에서, 복수의 수렴 광 빔(201, 202, 203, 204, 및 205) 각각은 적어도 2 개의 VCSEL에 의해 생성된다. 일 실시예에서, 복수의 수렴 광 빔(201, 202, 203, 204, 및 205)을 생성하는 VCSEL들 중 적어도 일부는 아래에 더 상세히 설명되는 바와 같이, 수직 공동 표면 방출 레이저 어레이의 일부이다. 일 실시예에서, VCSEL들의 어레이는 복수의 수렴 광 빔(201, 202, 203, 204, 및 205) 중 적어도 하나를 생성하도록 구성된다. 일 실시예에서, 복수의 수렴 광 빔(201, 202, 203, 204, 및 205) 중 적어도 하나를 생성하도록 구성된 VCSEL들의 어레이는 적어도 6 개의 VCSEL을 포함한다. 일 실시예에서, 광 빔들(201, 202, 203, 204, 및 205) 중 적어도 하나는 아래에 더 상세히 설명되는 바와 같이, 원형 패턴으로 배열된 VCSEL들의 어레이에 의해 생성된다.

[0035] 도 2에 도시된 바와 같이, 조명 광 빔들(201, 202, 203, 204, 및 205) 각각은 입자들, 이를테면 입자들(212 및 213)을 포함하는 입자 필드를 통해 각자의 방향을 따른 광학 경로에서 전파된다. 예컨대, 조명 광 빔(201)은 방향(206)을 따라 광학 경로상에서 전파되고 조명 광 빔(202)은 방향(209)을 따라 광학 경로상에서 전파된다. 일 실시예에서, 조명 광 빔들(201, 202, 203, 204, 및 205)의 광학 경로들은 상이하다. 일 실시예에서, 조명 광 빔들(201, 202, 203, 204, 및 205)의 파장들은 유사하다. 일 실시예에서, 조명 광 빔들(201, 202, 203, 204, 및 205)의 파장들은 약 650 nm이다. 다른 실시예에서, 조명 광 빔들(201, 202, 203, 204, 및 205)의 파장들은 상이하다. 일 실시예에서, 조명 광 빔들(201, 202, 203, 204, 및 205) 중 적어도 하나는 펄스 빔이다. 일 실시예에서, 입자들의 다중-빔 이미징을 위해 VCSEL들에 의해 생성되는 펄스 조명 광 빔들(201, 202, 203, 204, 및 205) 중 적어도 하나는 아래에 더 상세히 설명되는 바와 같이, 약 200 피코초(ps)의 빠른 상승 시간을 갖는다. 일 실시예에서, 빔들은 아래에 더 상세히 설명되는 바와 같이, 입자 운동을 "동결"시키기 위해 일제히 펄스된다. 일 실시예에서, 입자들(212 및 213)은 입자들(104 및 105)을 나타낸다.

[0036] 도 2에 도시된 바와 같이, 조명 광 빔들(201, 202, 203, 204, 및 205)은 이미징 시스템의 초점면(226)에 측정 볼륨(228)을 형성하기 위해 수렴한다. 도 2에 도시된 바와 같이, 측정 볼륨(228)은, 조명 광 빔들(201, 202, 203, 204, 및 205)이 겹치는 영역이다. 조명 광 빔들(201, 202, 203, 204, 및 205)은 다중 각도들로 서로 교차한다. 조명 광 빔들(201, 202, 203, 204, 및 205)은 광학 축(207)에 대해 각자의 각도에 있다. 도 2에 도시된 바와 같이, 빔(201)은 광학 축(207)에 대해 각도(208)에 있다. 빔(202)은 광학 축(207)에 대해 각도(211)에 있다. 일 실시예에서, 조명 광 빔들(201, 202, 203, 204, 및 205) 중 하나가 광학 축(207)에 대해 0도 각도에 있으면, 조명 광 빔들(201, 202, 203, 204, 및 205) 중 다른 조명 광 빔들은 광학 축(207)에 대해 0도 이외의 임의의 각도에 있을 수 있다.

[0037] 도 2에 도시된 바와 같이, 조명 광 빔들(201 및 202)은 각도(229)로 교차한다. 일 실시예에서, 각도(229)는 각도들(208 및 211)의 합이다. 초점면(226)에서 측정 볼륨(228)의 일부를 통과하는 입자(212)는 조명 광 빔들(201, 202, 203, 204, 및 205) 각각으로부터 복수의 개별 그림자, 이를테면 빔(202)으로부터 개별 그림자(219) 및 빔(201)으로부터 개별 그림자(222)를 생성한다. 초점면(226)에서 떨어진 거리(230)에서 측정 볼륨(228)의 일부를 통과하는 입자(213)는 조명 광 빔들(201, 202, 203, 204, 및 205) 각각으로부터 복수의 개별 그림자, 이를테면 빔(202)으로부터 개별 그림자(218) 및 빔(201)으로부터 개별 그림자(221)를 생성한다. 방향(206)에 수직인 축(A-A')을 따른 측정 볼륨(228)의 단면도(216)는 개별 그림자들(221 및 222)을 포함한다. 방향(209)에 수직인 축(B-B')을 따른 측정 볼륨(228)의 단면도(217)는 도 2에 도시된 바와 같이, 개별 그림자들(219 및 218)을 포함한다. 입자(212)의 그림자 이미지(223)는 이미징 시스템의 이미지 평면(227)상에 형성된다. 그림자 이미지(223)는 조명 광 빔들(201, 202, 203, 204, 및 205) 각각으로부터 개별 그림자들(예컨대, 이를테면 219 및 222)의 중첩으로 형성된다.

[0038] 도 2에 도시된 바와 같이, 그림자 이미지(223)는 조명 광 빔들(201, 202, 203, 204 및 205)에 의해 생성된 배경(231)과 실질적으로 상이하다. 개별 그림자 이미지들은 이미지 평면(227)상의 개별 그림자들, 이를테면 개별 그림자 이미지들(224 및 225)로부터 형성된다. 예컨대, 개별 그림자 이미지(224)는 개별 그림자(218)로부터 형성되고 개별 그림자 이미지(225)는 개별 그림자(216)로부터 형성된다. 개별 그림자 이미지들 각각은 이미지 평면(227)상의 그림자 이미지(223)로부터 거리(232)에 포지셔닝된다. 입자(213)의 개별 그림자 이미지들은 겹치지 않고 이미지 평면(227)상의 거리만큼 서로 분리된다. 일 실시예에서, 그림자 이미지(223)와 배경(227) 사이의 콘트라스트는 개별 그림자 이미지들(224 및 225) 각각과 배경(231) 사이의 콘트라스트보다 크다. 개별 그림자 이미지들(224 및 225)의 조명 강도들은 배경(231)의 조명 강도들과 실질적으로 동일하다.

[0039] 일 실시예에서, 배경(231)의 조명 강도가 모니터링되고, 복수의 VCSEL 중 적어도 하나의 VCSEL의 강도가 그림자 이미지(223)를 획득하기 위해 모니터링된 배경 조명에 기반하여 조정된다. 일 실시예에서, 그림자 이미지(22

3)와 배경(231) 사이의 콘트라스트가 측정된다. 일 실시예에서, 측정된 콘트라스트가 미리 결정된 콘트라스트보다 크지가 결정된다. 측정된 콘트라스트가 미리 결정된 콘트라스트보다 크면, 배경(231)에서 그림자 이미지(231)가 검출된다. 콘트라스트가 미리 결정된 콘트라스트보다 크지 않으면, 배경(231)에서 그림자 이미지(231)가 검출되지 않는다. 검출된 그림자 이미지(223)에 기반하여 입자(212)가 식별된다. 식별된 입자(212)의 크기는 아래에 더 상세히 설명되는 바와 같이, 그림자 이미지(223)로부터 결정된다.

[0040] 일 실시예에서, 조명 광 빔들은 아래에 더 상세히 설명되는 바와 같이, 디지털 카메라와 동기화된다. 일 실시예에서, 조명 광 빔들의 하나 이상의 교차 각도는 이미징 시스템의 초점면(226)에서 측정 볼륨(228)을 설정하고 측정 볼륨(228) 외부에 있는 입자들의 그림자 이미지들을 제거하도록 조정된다. 일 실시예에서, 조명 광 빔들의 양은 측정 볼륨(228) 외부에 있는 입자들의 그림자 이미지들을 제거하도록 조정된다.

[0041] 도 3은 복수의 VCSEL을 사용하여 다중-빔 이미징을 제공하는 시스템(300)의 일 실시예를 도시하는 도면(300)이다. 시스템(300)은 송신기 시스템(301) 및 수신기 시스템(330)을 포함한다. 송신기 시스템(301)은 복수의 조명 광 빔(예컨대, 입자들(예컨대, 방향(309)을 따라 이동하는 입자들(306, 307, 및 308)을 포함하는 입자 필드를 통해 다중 광학 경로에서 전파되는 조명 광 빔(304) 및 조명 광 빔(305))을 생성하는 하나 이상의 VCSEL 소스(예컨대, VCSEL 소스(302) 및 VCSEL 소스(303))를 포함한다. 위에서 설명된 바와 같이, VCSEL 소스들에 의해 생성된 조명 광 빔들은 수렴하여 이미징 시스템의 초점면(331)에서 측정 볼륨을 형성하여 이미징 시스템의 이미지 평면(124)상의 배경 조명에 균일성을 제공하고 이미지 평면에서 초점이 맞지 않는 그림자들을 제거한다. 도 3의 조명 광 빔들은 도 1 및 2의 조명 광 빔들로 표시된다.

[0042] 일 실시예에서, 송신기 시스템(301)은 트리거링 광 빔(도시되지 않음)을 생성하기 위해 하나 이상의 VCSEL 소스에 결합된 광 소스를 포함한다. 일 실시예에서, 미국 특허 출원 S/No. 15/552,263호에 설명된 바와 같이, 입자가 측정 볼륨에서 검출되면, 트리거링 광 빔이 전달되어 복수의 조명 광 빔을 생성한다.

[0043] 위에서 설명된 바와 같이, 수신기 시스템(330)은 초점면(331)에서 측정 볼륨을 통과하는 입자(306)의 그림자 이미지를 제공하기 위해 복수의 VCSEL 소스 중 적어도 하나에 결합된 이미징 광학기기 및 이미징 광학기기에 결합된 하나 이상의 디지털 카메라를 포함한다. 일 실시예에서, 다중 디지털 카메라들(예컨대, 디지털 카메라들(316, 317 및 310))이 사용되어 입자들의 동적 범위를 조정한다. 일 실시예에서, 입자들의 크기 동적 범위는 약 300:1이다.

[0044] 도 3에 도시된 바와 같이, 수신기 시스템(330)의 이미징 광학기기는 위에서 설명된 바와 같이, 조명 광 빔들 각각으로부터 입자(306)의 개별 그림자들을 수신하기 위해 하나 이상의 수신기 렌즈(311)를 포함한다. 하나 이상의 이미지 전달 렌즈(312)는 입자(306)의 개별 그림자 이미지들을 빔 분할기(313)에 전달한다. 빔 분할기(313)는 입자(306)의 개별 그림자 이미지들을 포함하는 조명 광 빔들을 부분(332) 및 부분(333)으로 분할한다. 부분(332)은 하나 이상의 포커싱 렌즈(314)로 전송되어 디지털 카메라(316)의 이미지 평면상에 입자(306)의 그림자 이미지를 형성한다. 부분(333)은 하나 이상의 포커싱 렌즈(315)로 전송되어 디지털 카메라(317)의 이미지 평면상에 입자(306)의 그림자 이미지를 형성한다. 이미징 시스템은 입자(306)의 개별 그림자 이미지들을 포함하는 조명 광 빔들을 부분(334) 및 부분(335)으로 분할하기 위해 빔 분할기(319)를 선택적으로 포함한다. 이 경우, 부분(334)은 빔 분할기(313)로 전송되어 디지털 카메라들(316 및 317)의 대응하는 이미지 평면들상에 입자(306)의 그림자 이미지를 형성한다. 부분(335)은 하나 이상의 포커싱 렌즈(318)로 전송되어 디지털 카메라(310)의 이미지 평면상에 입자(306)의 그림자 이미지를 형성한다. 일 실시예에서, 다중 카메라 접근법은 넓은 크기 범위에 걸쳐 고해상도로 입자들 크기를 정할 수 있도록 상이한 배율을 허용하는 데 사용된다.

[0045] 프로세싱 시스템(320)은 수신기 시스템(330)에 결합된다. 프로세싱 시스템(320)은 프로세서(321), 메모리(322), 및 측정 볼륨을 통과하는 입자들의 그림자 이미지들을 디스플레이하는 디스플레이(323)를 포함한다. 일 실시예에서, 프로세서(321)는 배경 조명을 모니터링하고 입자의 그림자 이미지를 획득하기 위해 모니터링된 배경 조명에 기반하여 복수의 VCSEL 중 적어도 하나의 VCSEL의 강도를 조정하기 위해 하나 이상의 디지털 카메라에 결합된다.

[0046] 일 실시예에서, 프로세서(321)는 그림자 이미지와 배경 사이의 콘트라스트를 측정하고 측정된 콘트라스트가 미리 결정된 콘트라스트보다 크지를 결정하기 위해 하나 이상의 디지털 카메라에 결합된다. 측정된 콘트라스트가 미리 결정된 콘트라스트보다 크면, 프로세서(321)는 배경으로부터 그림자 이미지를 검출하도록 구성된다. 콘트라스트가 미리 결정된 콘트라스트보다 크지 않으면, 프로세서(321)는 배경에서 그림자 이미지를 검출하지 않도록 구성된다. 프로세서(321)는 검출된 그림자 이미지에 기반하여 입자를 식별하도록 구성된다. 프로세서(321)는 아래에 더 상세히 설명되는 바와 같이, 그림자 이미지로부터 식별된 입자의 크기를 결정하도록 구성된다.

- [0047] 다른 실시예에서, 프로세서(321)는 아래에 더 상세히 설명되는 바와 같이, 그림자 이미지를 검출하고, 그림자 이미지에 기반하여 입자의 심도, 입자의 초점, 또는 둘 모두를 평가하여, 평가에 기반하여 입자의 타입을 결정하고, 그리고 입자의 타입에 기반하여 입자 정보를 결정하도록 구성된다.
- [0048] 일 실시예에서, 이미징 시스템의 크기 범위는 $0.05 \mu\text{m}$ 내지 $3000 \mu\text{m}$ 의 동적 크기 범위를 커버하도록 확장된다. 이것은 고해상도와 매우 효율적인 이미지 캡처로 달성될 수 있고 상이한 배율과 별도의 CMOS 카메라들을 사용하여 이미지 프로세싱 컴퓨터로 전달될 수 있다.
- [0049] 도 1, 도 2 및 도 3에 설명된 바와 같이, 다중-빔 조명 시스템은 공통 측정(프로브) 볼륨에 수렴하도록 정렬된 다중 광 소스를 포함한다. 일 실시예에서, 다중 광 소스는 25 나노초(ns) 미만의 펄스 지속기간까지 동시에 펄싱되고, 그러므로 현미경 이미징 시스템에 의해 분석되는 작은 스케일(scale)들에서도 입자들의 움직임을 동결시킨다. 이런 접근법은 상이한 레이저 파면들의 위상들을 병합하여 레이저 스펙클과 회절을 최소화하면서, 샘플 볼륨에 강렬한 상대적 균일 조명을 제공한다. 보다 균질한 배경을 생성하는 것은 고해상도 및 고품질 이미지들을 달성하기 위해 중요하다. 다중-빔 조명의 장점은, 수렴 레이저 빔들이 측정 볼륨을 가로지르는 상이한 광학 경로에서 비롯된다. 큰 입자가 샘플 볼륨 외부의 하나의 빔을 가로지르는 경우, 다른 빔들이 이 입자에 의해 우연히 영향을 받지 않기 때문에 이 입자에 의해 생성된 그림자는 배경 조명에 큰 영향을 주지 않는다. 빔들이 교차하고 겹치는 위치와 일치하는 프로브 볼륨에서 이미징 시스템의 심도 내를 통과하는 입자들만이 날카로운 깊은 그림자들을 형성한다. 초점면 외부로 프로브 볼륨을 통과하는 입자들은, 그림자가 임의의 순간 및 위치에서 하나의 빔에만 나타나기 때문에 깊은 그림자들을 생성하지 않는다. 따라서, 비교적 조밀한 스프레이들 및 매우 큰 방울들을 갖는 조건들(SLD 조건들)에서도, 초점이 맞지 않는 이미지들로 인한 배경 노이즈가 최소화된다.
- [0050] 도 4는 일 실시예에 따른 다중-빔 조명 시스템을 예시하는 도면(400)이다. 복수의 조명 광 빔(예컨대, 조명 광 빔들(401, 402, 403, 428, 및 429)은 입자들, 이를테면 입자들(405, 406, 및 407)을 포함하는 입자 필드를 통해 각자의 방향들을 따라 각자의 광학 경로들에서 전파된다. 입자들(405, 406, 및 407)은 도 1-도 3에 관하여 위에서 설명된 입자들을 나타낸다. 조명 광 빔들(401, 402, 403, 428, 및 429)은 도 1-도 3에 관하여 설명된 조명 광 빔들을 나타낸다. 조명 광 빔들은 수렴하여 이미징 시스템의 초점면에 측정 볼륨을 형성한다. 이미징 시스템의 초점면은 A-A' 축을 따라 전파된다. 측정 볼륨은 도 4에 도시된 바와 같이, 조명 광 빔들 모두가 겹치는 영역이다.
- [0051] 이미징 시스템의 초점면에서 측정 볼륨의 일부를 통과하는 입자(406)는 이미징 시스템의 이미지 평면에 입자(406)의 그림자 이미지(426)를 형성하기 위해 겹치는 조명 광 빔들 각각으로부터 복수의 개별 그림자를 생성한다. 광학 축(404)에 수직인 축(A-A')을 따른 측정 볼륨의 단면도(411)는 그림자 이미지(426)를 포함한다. 초점면(A-A') 이전에 조명 광 빔(403)을 통과하는 입자(405)는 조명 광 빔(403)으로부터 개별 그림자(425)를 생성한다. 입자(405)는 조명 광 빔들(401 및 402)과 같은 다른 조명 광 빔들로부터 개별 그림자들을 생성하지 않는다. 광학 축(404)에 수직인 축(B-B')을 따른 조명 광 빔들의 단면도(408)는 빔(403)에 의해 야기되는 개별 그림자(425)를 포함한다. 초점면(A-A') 이후에 조명 광 빔들(403 및 428)을 통과하는 입자(407)는 조명 광 빔들(403 및 428)로부터 개별 그림자(427)를 생성한다. 입자(407)는 조명 광 빔들(401 및 402)과 같은 다른 조명 광 빔들로부터 개별 그림자들을 생성하지 않는다. 광학 축(404)에 수직인 축(C-C')을 따른 조명 광 빔들의 단면도(409)는 빔들(403 및 428)에 의해 야기되는 개별 그림자들의 중첩인 그림자(427)를 포함한다.
- [0052] 그래프(410)는 광 강도(416) 대 CCD 어레이(415)상의 거리의 일 실시예를 예시한다. 광 강도(416)는 그래프(410)에 도시된 바와 같이, 피크 강도에서 완전한 그림자까지 변화한다. 피크 강도는 빔들 중 적어도 하나를 가로지르는 입자가 없을 때 배경 조건에 대응한다. 그래프(410)에 도시된 바와 같이, CCD 어레이의 영역(413)에서 입자(406)의 그림자 이미지(426)의 광 강도는 CCD 어레이의 영역(412) 및 영역(414)의 광 강도보다 실질적으로 더 낮다. 즉, 입자(406)의 그림자 이미지는 배경 피크 광 강도 및 개별 그림자 이미지들(425 및 427)의 광 강도와 실질적으로 상이하다.
- [0053] 도 4b에 도시된 바와 같이, 조명 광 빔들은 측정 볼륨에서 수렴하여 백색광 조명을 예물레이팅한다. 일 실시예에서, 컬러 CCD들(RGB)은 그림자 이미지에 대한 컬러 정보를 추출하는 데 사용된다. 컬러 정보는 입자 그림자들에 대한 추가 차원 정보를 제공할 수 있다. 다양한 컬러 조명 사이의 지연들은 또한 속도를 측정하는 데 사용될 수 있다(단일 레이저의 이중 펄싱과 유사). 일 실시예에서, 이중 펄스 이미징은 액적 및 스프레이 구조 크기 및 속도를 획득하기 위해 그림자 입자 이미지 속도계(PIV) 이미지들을 제공하기 위해 구현된다. 하나 이상의 조명 펄스의 지속기간은 자연스럽게 이미징 시스템의 해상도 및 목표 입자의 속력에 의해 제한된다. 일

실시예에서, 현미경 이미징을 위해, 약 20 ns의 최대 펄스 지속기간이 사용된다(100 m/s에서 2 μ m 블러(blur)). 예컨대, 입자가 100 m/s로 이동하면, 20 ns에서 2 μ m 이동할 것이다. 이것은 2 마이크로만크 에지들을 블러링할 것이다. 더 작은 입자들의 경우, 더 짧은 펄스 지속기간이 블러를 최소화하는 데 사용된다. 일 실시예에서, 교차 각도, 빔들의 수 및 파장들과 같은 조명 광 빔들의 파라미터들은 초점면 외부의 입자의 개별 그림자 이미지들이 형성되는 것을 방지하도록 최적화된다.

[0054] 도 5a는 일 실시예에 따른 다중-빔 입자 이미징 시스템의 수직 공동 표면 방출 레이저(VCSEL) 소스의 개략적인 레이아웃을 예시하는 도면(500)이다. 일반적으로, VCSEL 소스는 VCSEL 디바이스 제조의 통상의 기술자에게 알려진 바와 같이, 기판상에서 서로의 상부에서 성장되는 복수의 반도체 층을 포함한다. 도 5a에 도시된 바와 같이, VCSEL 소스는 금속 접촉 층(502)상의 기판(512)상의 회절 브래그 격자(DBR) 층(503)상의 활성 양자 우물(QW) 층(501)을 포함한다. DBR 층(506)은 활성 QW 층(501)상의 산화물 애퍼처 층(oxide aperture layer)(506)상에 증착된다. 금속 접촉 층(505)은 DBR 층(507)상에 증착된다. 절연 층(508)은 DBR 층(503), DBR 층(507) 및 금속 접촉 층(507)의 부분들상에 증착된다. 금속 패드(508)는 금속 접촉 층(505)에 연결하기 위해 절연 층(508)상에 증착된다. 일반적으로, VCSEL의 레이저 매질에서, 광은 층들에 수직으로 진동하고 디바이스의 상단(또는 하단)을 통해 빠져나간다. 도 5a에 도시된 바와 같이, 광(509)은 층들(501, 503, 505, 506 및 507)에 수직으로 진동하고 디바이스 구조의 상단을 통해 출력된다. 이것은 도 5b에 도시된 바와 같이, 거의 톱-햇 원형 빔 프로파일(511)을 초래한다.

[0055] 도 5b는 일 실시예에 따른 VCSEL 소스에 의해 생성된 광 빔 프로파일(511)의 예를 도시하는 도면(510)이다. 도 5b에 도시된 바와 같이, 광 빔 프로파일(511)은 실질적으로 원형 대칭 빔 프로파일이다. 일 실시예에서, VCSEL 소스의 빔 발산 각도는 약 20도이다($1/e^2$). 일 실시예에서, VCSEL 소스에 의해 생성된 광 빔은 LED들의 전송 거리보다 더 큰 거리에 걸쳐 전송을 위해 시준된다. 빔 프로파일(511)은 입자 이미징 애플리케이션들에 이상적이며 가까운 준-톱-햇 프로파일이다.

[0056] 도 5c는 이미징 시스템의 초점면으로부터 상이한 거리들에서 측정 볼륨을 통과하는 입자들의 다중-빔 조명 이미지들의 예를 도시하는 도면(520)이다. 도 5c에 도시된 바와 같이, 조명 빔들 각각에 의해 형성된 입자의 그림자 이미지들은, 입자가 이미징 시스템의 초점면에서 멀어짐에 따라 서로 멀어지게 이동한다. 이미지(511)는 이미징 시스템의 초점면에서 측정 볼륨을 통과하는 입자들의 그림자 이미지들을 도시한다. 이미지(511)에 도시된 바와 같이, 조명 빔들 각각에 의해 형성된 입자의 개별 그림자 이미지들은 완전히 겹쳐져, 배경으로부터 실질적으로 분리된 그림자 이미지(521)를 형성한다. 이미지(512)는 이미징 시스템의 초점면으로부터 약 100 μ m 떨어진 측정 볼륨을 통과하는 입자들의 그림자 이미지들을 도시한다. 이미지(512)에 도시된 바와 같이, 조명 빔들 각각으로부터의 입자의 개별 그림자 이미지들은 부분적으로만(약 75 %) 겹쳐져, 이미지(521)보다 배경에서 더 블러링되고 덜 분리된 그림자 이미지(522)를 초래한다. 이미지(513)는 이미징 시스템의 초점면으로부터 약 200 μ m 떨어진 측정 볼륨을 통과하는 입자들의 그림자 이미지들을 도시한다. 이미지(513)에 도시된 바와 같이, 조명 빔들 각각으로부터의 입자의 개별 그림자 이미지들은 약 50 %만 겹쳐져, 이미지(522)보다 배경에서 더 블러링되고 덜 분리된 그림자 이미지(522)를 초래한다.

[0057] 먼 거리들에서 고해상도 이미지들을 캡처하는 것은 어렵지만, 조밀한 입자 필드들이 광 소스, 프로브 볼륨 및 수집 광학기기 사이의 광학 경로들을 가릴 때 어려움은 증가한다. 다중-빔 조명 접근법은 광 소스들로부터의 상이한 광학 경로들에 의존하여, 빔 경로를 따라 개별 입자들에 의한 정시 그림자를 극복한다.

[0058] 기존 입자 이미징 시스템들은 배경 조명의 균일성 부족으로부터 고통을 받는다. 조명 시스템에 사용되는 일관되고 높은 단색 레이저 소스들은 스펙클 및 회절 패턴들을 생성한다. 스펙클 및 회절 패턴들은 이미지 프로세싱 알고리즘이 최적의 조건들에서 수행되는 것을 방지하여, 결과들에 영향을 준다.

[0059] 도 6a는 일 실시예에 따른 VCSEL 어레이의 2-차원 조명 프로파일(602) 및 LED 시스템의 2-차원 조명 프로파일(603)을 예시하는 도면(600)이다. VCSEL 어레이들의 빔 발산 각도는 약 20도이다. 일 실시예에서, 다중-빔 입자 이미징을 위한 VCSEL 어레이는 빔을 좁은 발산 분포들로 성형하는 통합 광학기기를 포함하여, VCSEL 어레이에 의해 생성된 빔은 LED들의 전송 거리보다 더 큰 거리에 걸쳐 전송을 위해 시준 될 수 있다. 도 6a에 도시된 바와 같이, 2-차원 프로파일(602)에 의해 표현된 조명 분포는 2-차원 조명 프로파일(603)에 비해 실질적으로 좁은 각도를 가지며, 이는 VCSEL이 예컨대 광을 수집하고 원격으로 장면으로 지향하도록 할 때 유리하게 한다. LED들은 통상적으로 폴리메틸-메타크릴레이트(PMMA) 또는 유리 돔(dome)이 장착되어, 다이 이미터의 준-램버시안(quasi-Lambertian)으로부터의 광을 다소 넓은 가우시안 분포로 성형한다. 다른 한편, VCSEL 디바이스들은 축에 딥(dip)이 가능한 톱-햇 모양에 가까운 발광 프로파일을 제시한다. VCSEL의 적절한 광학 구현은 효율적인

광 투과를 허용한다. 일 실시예에서, 입자들의 다중-빔 이미징을 위한 VCSEL 어레이들은 레이저 스펙클을 최소화하는 LED 시스템의 코히어런스 길이와 유사한 매우 짧은 코히어런스 길이를 갖도록 구성된다. 일 실시예에서, 입자들의 다중-빔 이미징을 위한 VCSEL 어레이들은 1 % 미만의 스펙클을 갖도록 구성되어, VCSEL들이 조명의 균일성을 제공하는 이미징 시스템에 이상적하게 한다. 일 실시예에서, 입자들의 다중-빔 이미징을 위한 VCSEL 어레이들의 VCSEL 소스는 매우 높은 속도들로 펄싱되고 일반적으로 나노초 미만의 매우 빠른 상승 시간들을 가지며, 이는 VCSEL 소스들이 펄스 레이저 입자 이미징 애플리케이션들에 이상적하게 한다. 일 실시예에서, 다중-빔 이미징 시스템을 위한 VCSEL 어레이는 860 nm 파장에서 750 mW 출력 전력을 생성하고, 약 200 개의 레이저를 포함한다.

[0060] 일 실시예에서, 입자들을 이미징하는 다중-빔 시스템은 전자 구동기 및 VCSEL 기술을 구현하는 광학 시스템을 포함한다. VCSEL의 펄스 특성은, 이런 디바이스들이 무선-전송에 널리 사용되기 때문에 빠른 것으로 알려져 있다. 일 실시예에서, 입자들의 다중-빔 이미징에 사용되는 VCSEL 어레이들은 이미징 시스템이 적절하게 응답하기에 충분한 강도로 장면을 조명하는 데 필요한 플럭스(flux)를 생성하는 전력을 출력하도록 구성된다. 일 실시예에서, 다중-빔 이미징 시스템의 전자 구동기는 고전류(최대 2 A)의 짧은 펄스를 생성 할 수 있고, VCSEL 어레이를 구동하는 0 V 내지 40 V 전압은 조명 광 빔들의 고속 성능 및 짧은 펄스 특성을 제공한다.

[0061] 도 6b는 일 실시예에 따른 다중-빔 이미징 시스템의 VCSEL 소스의 측정된 펄스 프로파일들을 도시하는 도면(610)이다. 도 6b에 도시된 바와 같이, VCSEL 소스의 측정된 펄스 프로파일(612)은 구동 펄스 지속기간 50 ns에서 생성되고, VCSEL 소스의 측정된 펄스 프로파일(613)은 구동 펄스 지속기간 100 ns에서 생성되고 VCSEL 소스의 측정된 펄스 프로파일(614)은 구동 펄스 지속기간 200 ns에서 생성된다.

[0062] 일 실시예에서, 프로파일들의 램프(ramp)들은 VCSEL의 대응하는 "활성" 기간에 걸쳐 겹친다. 상승의 제1 80 %에 대한 VCSEL의 슬루율(slew rate)은 매우 빠르고, 이어서 정체될 때까지 느려진다. 도 6b에 도시된 바와 같이, 펄스 신호는 펄스 지속기간에 따라 레벨이 상승한다. 더 긴 펄스 지속기간에서 더 높은 열 부하가 달성되어, 광검출기가 더 민감한 더 짧은 파장으로 VCSEL 스펙트럼을 구동한다는 설명이 있을 수 있다.

[0063] 도 6c는 일 실시예에 따른 스위칭 성능에 관한 VCSEL 시스템의 특성 속성을 예시하는 표(621)의 도면(620)이다. 표(621)는, 측정된 펄스 지속기간이 15 내지 200 ns에서 테스트된 모든 지속기간에 걸쳐 단지 7 ns 차이로 설정된 지속기간에 더 가깝다는 것을 도시한다. 이것은, 상승 시간이 15 ns에 가까움에도 불구하고, VCSEL의 스위칭 시간이 나노초 정도로 짧다는 것을 드러낸다. 하강 시간은 10 ns 미만에서 과도 상태가 달성되는 광학 스위칭 성능을 더 잘 나타낼 수 있다. 도 6a의 신호들을 자세히 살펴보면, 구동기의 슬루율이 신호 진폭의 약 80 %까지 매우 빠르고, 그 후 슬루율이 감소하고, 10 - 90 % 상승 시간 수치에 영향을 준다. 도 6a에 도시된 바와 같이, 부하 커패시턴스 및 구동기 상호 작용으로 인한 신호 진폭의 약 80 % 후에 슬루율이 떨어진다.

[0064] 도 6d는 일 실시예에 따른 다중-빔 이미징 시스템의 VCSEL 어레이의 측정된 스펙트럼(631)을 도시하는 도면(630)이다. 도 6c에 도시된 바와 같이, VCSEL 어레이는 LED 조명에 비해 높은 단색 광을 출력한다.

[0065] 도 6d에 도시된 바와 같이, VCSEL 어레이의 출력 파장은 860 nm에 중심이 두어진다. VCSEL 어레이는 최대 절반에서 1 nm 반치전폭에 가까운 스펙트럼 확산을 갖는 빔을 출력한다. 이런 좁은 스펙트럼 범위는 액체 또는 동결된 방울들과 인근 주위 가스들 사이의 인터페이스 같은 에지들 주변에 회절 패턴들을 생성할 수 있기 때문에, 가시선 소멸에 문제가 될 수 있다. 통상적으로 조명의 파장은 회절-제한 해상도를 결정한다. 더 긴 파장은 현미경 시스템들의 광학 해상도에 해로울 수 있다. VCSEL 어레이에 의해 생성된 좁은-발산, 거의-시준된 광은 높은 에너지 밀도를 가진 영역의 원격 조명 및 빔 성형을 위해 LED 조명에 비해 장점을 제시한다.

[0066] 도 7a는 일 실시예에 따른 다중-빔 이미징 시스템의 VCSEL 어레이(701)의 방출 영역의 사진(700)이다. 사진(700)은 디지털 현미경으로 취득된다. 도 7a에 도시된 바와 같이, VCSEL 어레이(701)의 방출 영역은 직경이 약 3 mm이다. VCSEL 어레이(701)는 VCSEL(702)과 같은 개별 VCSEL들을 포함한다. 도 7a에 도시된 바와 같이, 어레이의 각각의 VCSEL은 육각형 모양을 갖는다. 도 7a에 도시된 바와 같이, 어레이의 VCSEL들은 단일 빔을 생성하기 위해 원형 패턴으로 배열된다. 일 실시예에서, VCSEL 어레이는, 입자의 그림자 이미지를 획득하기 위해 배경 조명의 균일성을 증가시키기 위해 빔 발산 각도가 20 도의 통상적인 VCSEL 빔 발산 각도에서 약 7 도로 감소되도록 렌즈가 장착된다.

[0067] 일 실시예에서, 다중 조명 광 빔을 생성하기 위해 하나 이상의 VCSEL 어레이를 포함하는 다중-빔 입자 이미징 시스템은 배경에서 스펙클을 제거하고, 회절 패턴들을 감소 또는 제거함으로써 이미지 품질을 실질적으로 향상시킨다. 일 실시예에서, 다중 조명 광 빔을 생성하기 위한 하나 이상의 VCSEL 어레이를 포함하는 다중-빔 입자

이미징 시스템은 명시야 광학 현미경 애플리케이션들을 위한 가시선 구성으로 배열된다.

- [0068] 도 7b는 일 실시예에 따라 장면이 LED 소스에 의해 조명될 때 장거리 현미경에 의해 캡처된 해상도 차트(711) 및 장면이 VCSEL 소스에 의해 조명될 때 장거리 현미경에 의해 캡처된 해상도 차트(712)를 도시하는 도면(710)이다. LED 및 VCSEL 조명 소스들 모두는 펄싱되고, 카메라는 광 펄스들과 동기화된다.
- [0069] 도 7b에 도시된 바와 같이, 해상도 차트(712)는 해상도 차트(711)보다 더 균일하고 스펙클이 없는 광 강도 분포를 나타낸다. 도 7b에 도시된 바와 같이, 해상도 차트(712)는 해상도 차트(711)와 비교하여 광 강도 분포의 거의 톱-햇 프로파일을 갖는다. 도 7b에 도시된 바와 같이, 해상도 차트(712)는 해상도 차트(711)의 해상도보다 더 높은 해상도를 나타낸다.
- [0070] 도 8은 다중 조명 광 빔을 생성하기 위해 VCSEL 소스들을 포함하는 다중-빔 이미징 시스템의 다른 실시예를 예시하는 개략도(800)이다. 도 8에 도시된 바와 같이, 교차하는 조명 광 빔들(801 및 802)은 렌즈(818)를 통해 전파된다. 렌즈(818)는 초점 거리(816) 및 초점 거리(817)를 갖는다. 입자들(803 및 804)은 각각 평면들(811 및 808)에서 조명 광 빔들(801 및 802)을 겹침으로써 형성된 측정 볼륨을 통과한다. 그림자들(805 및 806)과 같은 입자들의 그림자들을 형성하는 조명 광 빔들은 렌즈(818) 및 디지털 카메라(예컨대, CMOS, CCD 어레이, 또는 다른 디지털 카메라)에 입사된다.
- [0071] 처음에, 평면(808)은 렌즈(818)의 초점면이다. 렌즈(818)의 초점면에 있는 입자(804)는 이미지 평면(809)에 단일 초점을 맞춘 그림자 이미지(807)를 생성한다. 입자(803)와 같은 초점면에서 떨어진 입자들은 이미지 평면에 두 개의 초점이 맞지 않는 그림자 이미지를 생성한다. 카메라가 평면(811)에 다시 초점이 맞춰진 후, 입자(803)의 개별 그림자들은 이미지 평면(812)의 단일 그림자(813)로 콜랩스(collapse)되는 반면, 이미지 평면(809)의 그림자는 개별 그림자(814)와 개별 그림자(815)로 분리될 것이다.
- [0072] 심도 및 무질서 원은 일반적으로 이미징 시스템의 요건들에 의해 설정된다. 그러나, 심도 문제는 이미징 시스템들을 사용하여 입자 크기 분포들을 측정할 때 측정 오류의 가장 심각한 원인 중 하나이다. 일반적으로, 심도는, 광학 기구가 물체의 선명한 이미지를 생성하는 범위를 나타낸다. 수신기 광학기구의 심도 외부에서 검출된 입자들은, 초점이 맞지 않은 입자 이미지들의 크기들이 실제 값들과 상이한 것으로 보이기 때문에 측정 오류를 크게 증가시킨다.
- [0073] 카메라는 조명에 의해 생성된 밝은 배경에서 개별 입자들을 검출하고 식별하여 개별 입자들에 의해 생성된 감쇠 또는 그림자 패턴을 모니터링한다. 적절하고 충분한 조명은 고품질 이미징 데이터를 획득하기 위해 신중하게 조정될 필요가 있는 중요한 파라미터이다. 그렇기 때문에 CMOS 카메라에서 배경 강도를 측정하고 이에 따라 광 강도를 조정하여 고품질 입자 이미지들을 캡처할 수 있는 것이 중요하다.
- [0074] 도 9a는 일 실시예에 따른 다중-빔 이미징 장치의 VCSEL 시스템에 의해 생성된 수렴 빔들에 의해 조명된 배경(901)의 이미지를 도시하는 도면(900)이다. 도 9a에 도시된 바와 같이, 배경(901)의 상이한 위치들(이를테면 위치(903) 및 위치(902))에서 VCSEL 소스들의 수렴 광 빔들에 의해 생성되는 조명 광 강도는 유사하므로, 전체 배경(901)에 걸친 광 강도 분포는 균일하다. 부드럽고 균일한 배경 조명은 이미지 프로세싱 알고리즘의 적절한 동작에 기여하며, 이는 배경과 입자들 사이의 강도 콘트라스트에 의존하여 피쳐(feature)를 식별하고 피쳐 크기를 정량화한다.
- [0075] 도 9b는 일 실시예에 따른 다중-빔 이미징 장치의 VCSEL 조명을 사용하여 생성된 단분산 액적들(911)의 이미지를 도시하는 도면(910)이다. 도 9b에 도시된 바와 같이, 배경 조명은 균일하고 스펙클이나 회절 노이즈를 도시하지 않는다.
- [0076] 도 9c는 다른 실시예에 따른 다중-빔 이미징 장치의 VCSEL 조명을 사용하여 생성된 단분산 액적들(921)의 이미지를 도시하는 도면(920)이다. 이 이미지는 도 9b의 이미지보다 낮은 배경 조명으로 취득되었다. 도 9c에 도시된 바와 같이, 이미지(921)의 배경 조명은 스펙클 또는 회절 노이즈가 없는 균일한 회색 조명이다.
- [0077] 도 10은 일 실시예에 따른 다중-빔 이미징 장치의 VCSEL 조명을 사용하여 생성된 조밀한 스프레이 이미지(1001)를 도시하는 도면(1000)이다. 조밀한 스프레이 이미지(1001)는 도 11 및 도 12에 도시된 바와 같이, 종래의 광 소스들을 사용하여 생성된 이미지들과 비교하여 초점이 맞는 입자들(어두운 그림자들)과 초점이 맞지 않는 입자들(회색 배경) 사이의 증가된 수축들을 도시한다.
- [0078] 도 11은 일 실시예에 따른 다중-빔 다이오드 레이저들을 사용하여 조명된 회박 입자 필드(1101)의 이미지를 도시하는 도면(1100)이다. 이 이미지에서, 다중-빔 접근법으로 인해 매끄러워진 배경에 스펙클의 시그니처를 관

찰할 수 있다. 배경 광 강도 분포는 균일하지 않고, 국소 분산은 상당히 높고, 이는 이미지 프로세싱 방법들에 스트레스를 주고 입자 특성화 결과들의 품질을 감소시킨다.

[0079] 도 12는 일 실시예에 따른 다중-빔 다이오드 레이저를 사용하여 조명된 조밀한 입자 필드(1201)의 이미지를 도시하는 도면(1200)이다. 도 12에 도시된 바와 같이, 배경은 도 11에 도시된 배경보다 훨씬 더 혼란스럽고 국소 레벨에서도 강도 차이가 더 크다. 배경 조명 강도에서 이러한 높은 레벨의 산란은 빔들을 간섭하는 입자들에 의해 생성된 다중 회절 패턴들로부터 비롯되고, 이미징 시스템의 초점면을 벗어난다. 스펙클 및 회절은 입자들 이미지들을 식별하고 측정할 때 소프트웨어의 오류들을 증가시킨다.

[0080] 도 13은 입자들을 이미징하는 시스템(1300)의 다른 실시예를 도시하는 도면이다. 시스템(1300)은 송신기 시스템(1301)을 포함한다. 송신기 시스템(1301)은 하나 이상의 광 소스(예컨대, VCSEL 어레이(1321) 및 VCSEL 어레이(1322))를 포함하여 광 빔들(1302 및 1303)과 같은 복수의 조명 광 빔을 생성한다. 송신기 시스템(1301)은 트리거링 광 빔(1304)을 생성하기 위한 광 소스(1323)를 포함한다. 송신기 시스템(1301)은 조명 광 빔들을 디지털 카메라 시스템(1308)과 동기화하기 위한 동기화 모듈(1324)을 포함한다. 조명 광 빔들은 입자들(예컨대, 입자들(1305 및 1306))을 포함하는 입자 필드를 통해 다중 광학 경로에서 전파되도록 구성된다. 조명 광 빔들은 수렴하여 이미징 시스템의 초점면에 측정 볼륨(1314)을 형성하도록 구성된다. 도 13의 조명 광 빔들은 도 1, 도 2 및 도 3의 조명 광 빔들로 표시된다. 일 실시예에서, 송신기 시스템(301)의 조명 광 소스들은 위에서 설명된 바와 같이, VCSEL들, 발광 다이오드들("LED들"), 또는 둘 모두를 포함한다. 일 실시예에서, 복수의 조명 광 빔은 하나 이상의 VCSEL 어레이에 의해 생성된다.

[0081] 일 실시예에서, 트리거링 광 소스에 의해 생성된 트리거링 광 빔(1304)은 측정 볼륨(1314)의 중심을 통해 전파된다. 일 실시예에서, 트리거링 광 소스는 레이저, LED 또는 둘 모두를 포함한다.

[0082] 수신기 시스템은 위에서 설명된 바와 같이, 이미징 광학기기(예컨대, 하나 이상의 렌즈(1307)) 및 초점면의 측정 볼륨을 통과하는 입자의 그림자 이미지를 제공하는 하나 이상의 디지털 카메라를 포함하는 디지털 카메라 시스템(1308)을 포함한다. 일 실시예에서, 트리거링 빔의 파장은 조명 광 빔들의 파장과 상이하다. 입자가 측정 볼륨을 통과할 때, 트리거링 광 빔(1304)은 입자에서 광검출기 시스템(1311)으로 편향되어 측정 볼륨(1314)에 입자의 존재를 나타내는 트리거 신호(1325)를 논리 회로(1312)로 출력하여 하나 이상의 레이저 소스를 구동한다. 논리 회로(1312)는 수렴 조명 광 빔들을 생성하기 위해 송신기 시스템(1301)의 하나 이상의 광원을 구동하기 위해 트리거 신호(1326)를 출력한다. 논리 회로(1312)는 디지털 카메라 시스템(1308)을 트리거하기 위해 트리거 신호(1325)를 출력한다. 일 실시예에서, 다중 VCSEL 레이저는 다중 방향에서 입자 필드를 동시에 조명하는 데 사용된다. 트리거 레이저 및 광검출기는 측정 볼륨에서 입자들의 존재를 검출하는 데 사용된다. 이 정보는 다중 조명 빔을 펄싱하는 데 사용된다. 레이저 빔들은 CMOS 센서에서 입자들의 동결된 그림자(예컨대, 명시야 이미지)를 생성하는 수신기 렌즈에 의해 결합된다. 다중-각도 조명의 사용은 종래의 기구에서 문제인 심도 변동들로 인한 측정 오류들을 크게 감소시킨다.

[0083] 이미징 시스템은 선택적으로, 도 3에 관하여 위에서 설명된 바와 같이, 하나 이상의 빔 분할기(도시되지 않음)를 포함하여 조명 광 빔들을 다중 디지털 카메라로 분할할 수 있다. 이미지 취득 및 프로세싱 시스템(1310)은 디지털 카메라 시스템(1308)에 결합된다. 본원에 설명된 바와 같이, 프로세싱 시스템(1310)은 본 방법들을 수행하는 프로세서(1315), 메모리(1316), 및 디스플레이(1317)를 포함한다. 일 실시예에서, 프로세서(1315)는 초점이 맞은 입자들을 식별하고, 다양한 모양의 파라미터를 계산하고, 입자들을 분류하는 것을 포함하는 입자 분석을 수행하도록 구성된다. 일 실시예에서, 프로세서(1315)는 액체 방울들과 얼음 결정들을 구별하도록 구성된다.

[0084] 도 14는 일 실시예에 따른 입자들의 다중-빔 이미징을 제공하는 방법(1400)의 흐름도를 도시한다. 동작(1401)에서, 위에서 설명된 바와 같이, 입자 필드 내에 측정 볼륨을 형성하기 위해 서로 수렴하는 복수의 광 빔은 측정 볼륨의 배경 조명에 균일성을 제공하도록 복수의 수직 공동 표면 방출 레이저(VCSEL)를 사용하여 생성된다. 동작(1402)에서, 디지털 카메라의 초점면에서 측정 볼륨을 통과하는 입자의 그림자 이미지가 획득된다. 동작(1403)에서, 획득된 그림자 이미지와 배경 조명 사이의 콘트라스트가 결정된다. 동작(1404)에서, 입자는 콘트라스트에 기반하여 식별된다. 동작(1405)에서, 위에서 설명된 바와 같이, 식별된 입자의 크기는 그림자 이미지에 기반하여 결정된다.

[0085] 도 15는 다른 실시예에 따른 입자들의 다중-빔 이미징을 제공하는 방법(1500)의 흐름도를 도시한다. 동작(1501)에서, 위에서 설명된 바와 같이, 입자 필드 내에 측정 볼륨을 형성하기 위해 서로 수렴하는 복수의 광 빔은 측정 볼륨의 배경 조명에 균일성을 제공하도록 복수의 VCSEL을 사용하여 생성된다. 동작(1502)에서, 배경

조명의 균일성이 모니터링된다. 예컨대, 이미지상의 배경 영역의 상이한 위치에서 배경 조명의 차이가 미리 결정된 임계치보다 큰지 여부가 결정된다. 동작(1503)에서, VCSEL들 중 적어도 하나의 출력 빔이 모니터링에 기반하여 조정된다. 예컨대, VCSEL들 중 적어도 하나의 하나 이상의 파라미터(예컨대, 출력 광 강도, 각도, 펄스, 파장, 또는 이들의 임의의 조합)는, 이미지상의 배경 영역의 상이한 위치에서의 배경 조명의 차이가 미리 결정된 임계치보다 큰 경우, 배경 조명의 균일성을 증가시키도록 조정된다. 동작(1504)에서, 디지털 카메라의 초점면에서 측정 볼륨을 통과하는 입자의 그림자 이미지가 조정된 배경에 기반하여 결정된다.

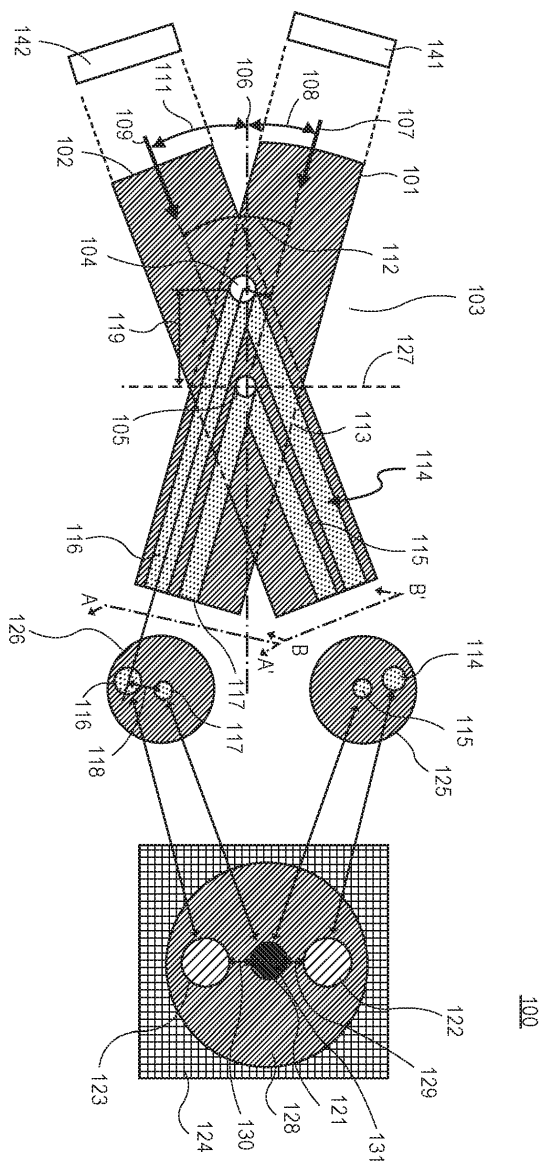
[0086] 도 16a는 입자들을 이미징하는 시스템의 일 실시예를 예시한다. 시스템(1620)은 장착 고정구(1621) 및 장착 고정구(1622)와 같은 하나 이상의 장착 고정구를 포함한다. 장착 고정구(1621)는 복수의 VCSEL 소스, 이를테면 VCSEL 어레이(1623) 및 VCSEL 어레이(1624)를 포함하는 송신기 서브-시스템의 일부를 포함한다. 장착 고정구(1622)는 복수의 VCSEL 소스, 이를테면 VCSEL 어레이(1625) 및 VCSEL 어레이(1626)를 포함하는 송신기 서브-시스템의 일부를 포함한다. VCSEL 소스들 각각은 조명 레이저 빔을 형성하기 위해 VCSEL 어레이의 출력에 결합된 하나 이상의 포커싱 렌즈를 포함한다. 위에서 설명된 바와 같이, 복수의 조명 레이저 빔, 이를테면 조명 레이저 빔(1627) 및 조명 레이저 빔(1628)은 입자 필드 내에 측정 볼륨을 형성하기 위해 서로 수렴하는 VCSEL 소스들에 의해 생성되어 측정 볼륨과 연관된 배경 조명에 균일성을 제공한다. 일 실시예에서, 위에서 설명된 바와 같이, 시스템(1600)은 제1 디지털 카메라의 초점면에서 측정 볼륨을 통과하는 입자의 그림자 이미지를 제공하는 이미징 광학기기를 포함하는 수신기 모듈(도시되지 않음)을 포함한다.

[0087] 도 16b는 입자들을 이미징하는 시스템의 일 실시예를 예시한다. 도 16b에 도시된 바와 같이, 시스템(1600)은 위에서 설명된 바와 같이, 입자들(1603)을 조명하기 위한 측정 볼륨을 형성하기 위해 수렴하는 조명 광 빔을 생성하기 위한 복수의 VCSEL을 포함하는 송신기(1605)를 포함한다. 도 16b에 도시된 바와 같이, 수신기(1602)는 위에서 설명된 바와 같이, 입자들(1603)의 그림자를 수신하도록 결합된다. 도 16b에 도시된 바와 같이, 수신기(1606)는 신호 프로세서(1604)에 결합된다. 도 16b에 도시된 바와 같이, 중앙 프로세싱 유닛("CPU")을 포함하는 서브시스템(1606), 디스플레이 디바이스와 결합될 수 있는 그래픽 프로세싱 유닛("GPU")을 포함하는 서브시스템(1607), 하나 이상의 I/O 디바이스에 결합된 하나 이상의 I/O 제어기를 포함하는 하나 이상의 서브시스템(1608), 메모리(1605)(휘발성 RAM, ROM 및 비-휘발성 메모리(예컨대, 플래시 메모리 또는 하드 드라이브), 또는 이들의 임의의 조합을 포함함), 및 마이크로제어기를 포함하는 신호 프로세서(1604)는 버스(1609)에 결합된다. 서브시스템(1606) 및 신호 프로세서(1604) 중 적어도 하나는 위에서 설명된 바와 같은 방법들을 수행하도록 구성된다. 메모리(1605)는 데이터 프로세싱 시스템에 의해 액세스될 때 데이터 프로세싱 시스템으로 하여금 위에서 설명된 바와 같이, 입자들의 다중-빔 이미징을 제공하는 하나 이상의 방법을 수행하게 하는 데이터를 저장하는 데 사용될 수 있다.

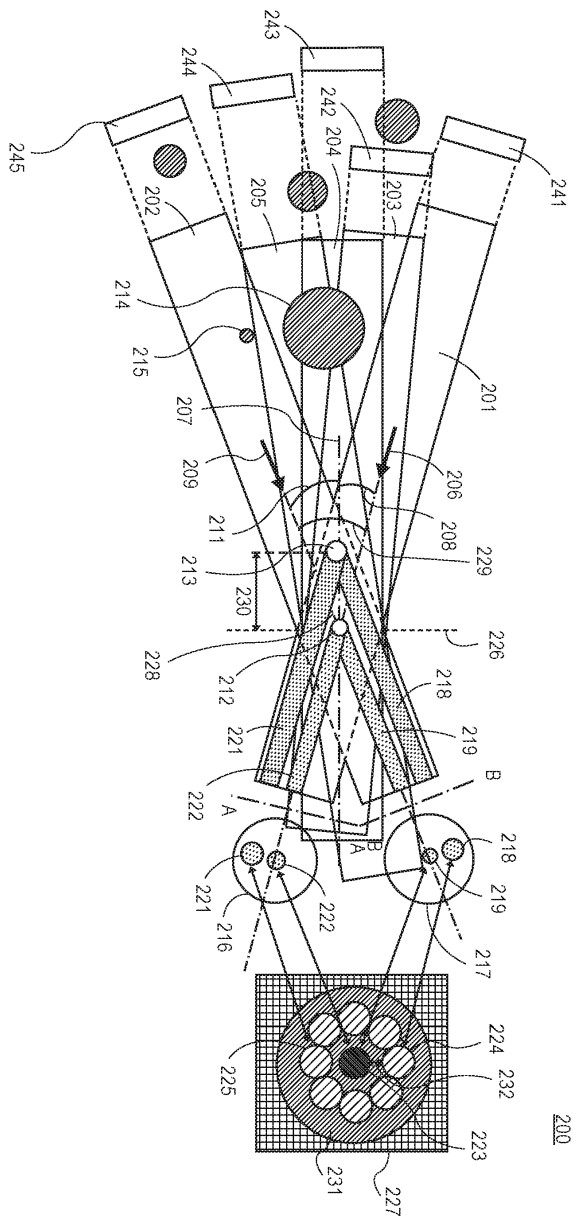
[0088] 전술한 명세서에서, 본 발명은 특정 예시적인 실시예들을 참조하여 설명되었다. 그러나, 본 발명의 더 넓은 사상 및 범위를 벗어나지 않고 다양한 수정 및 변경이 이루어질 수 있음이 명백할 것이다. 따라서, 본 명세서 및 도면들은 제한적 의미보다 예시적인 의미로 간주되어야 한다.

도면

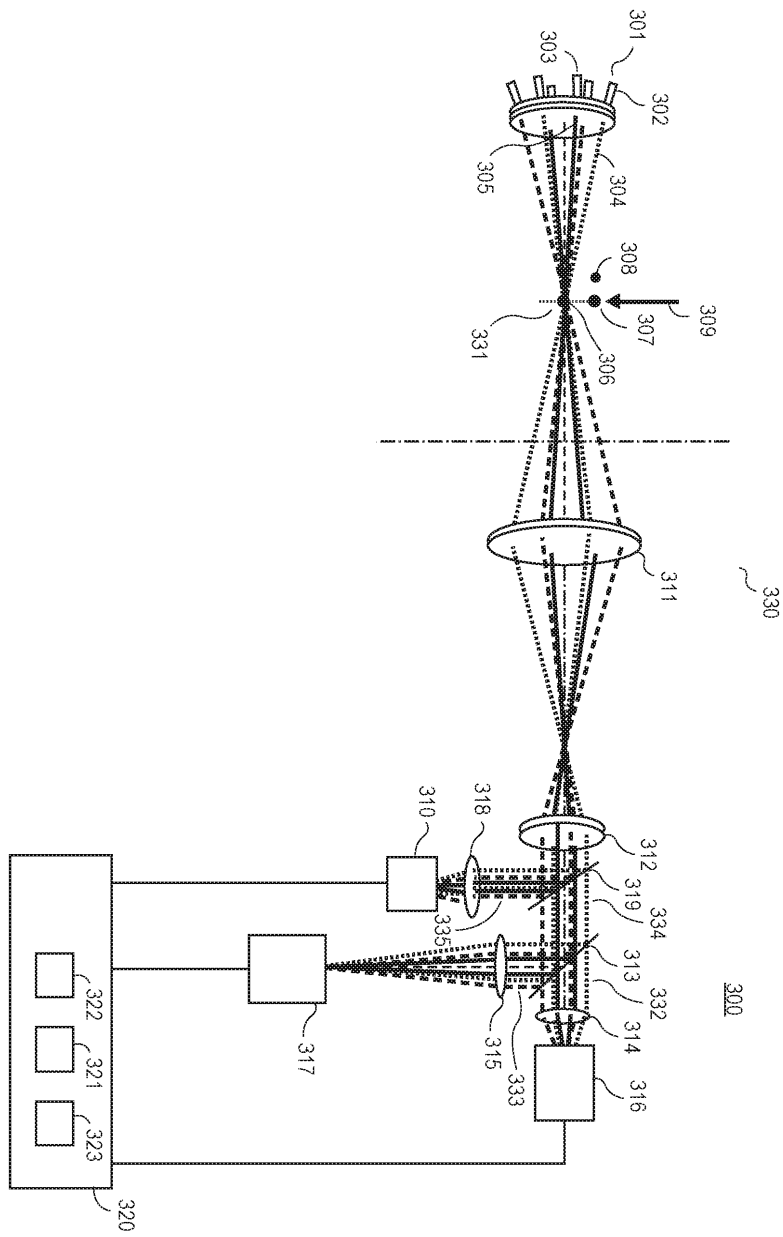
도면1



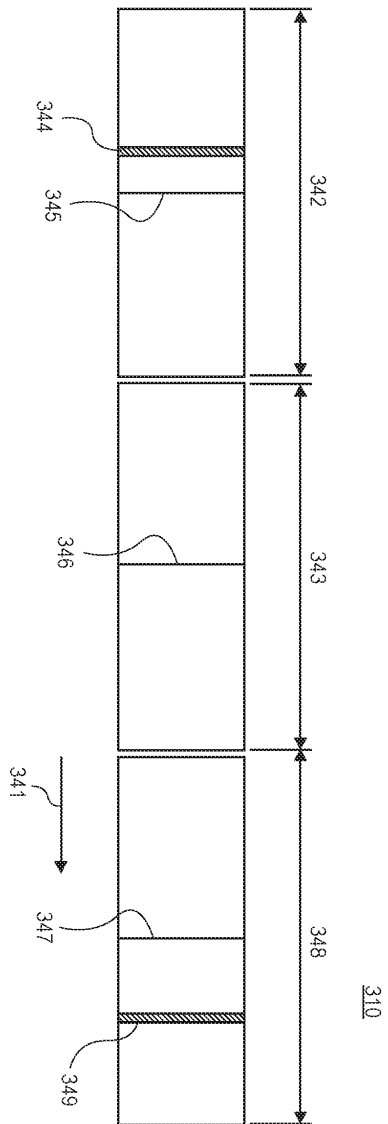
도면2



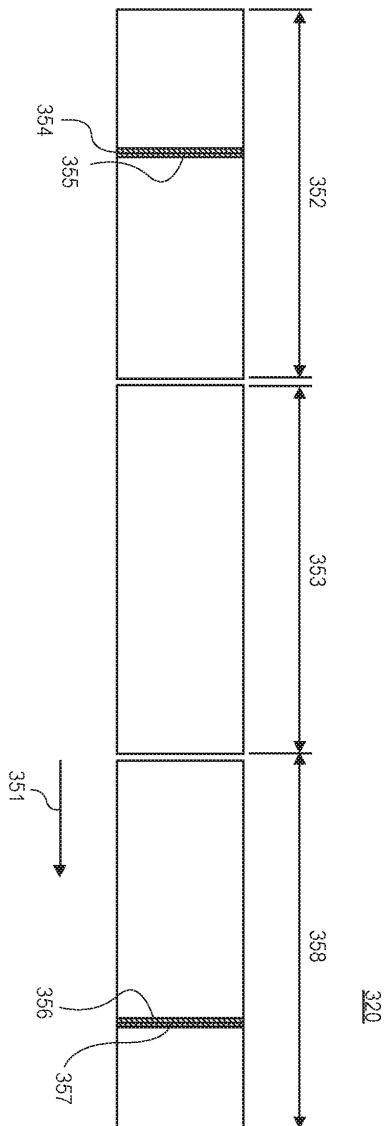
도면3a



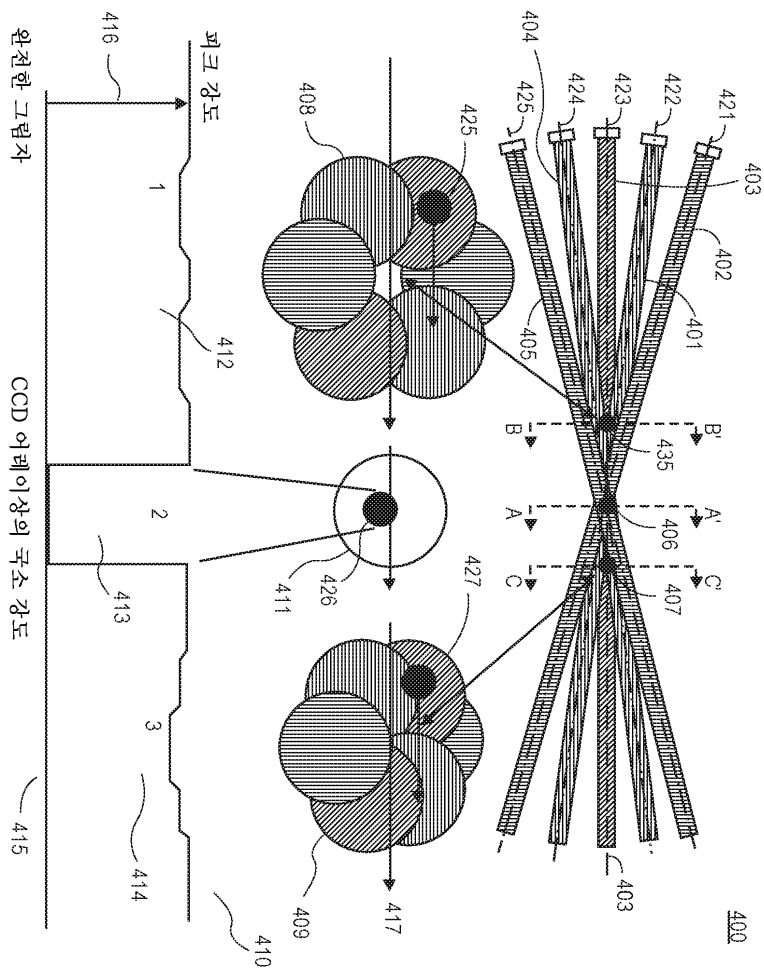
도면3b



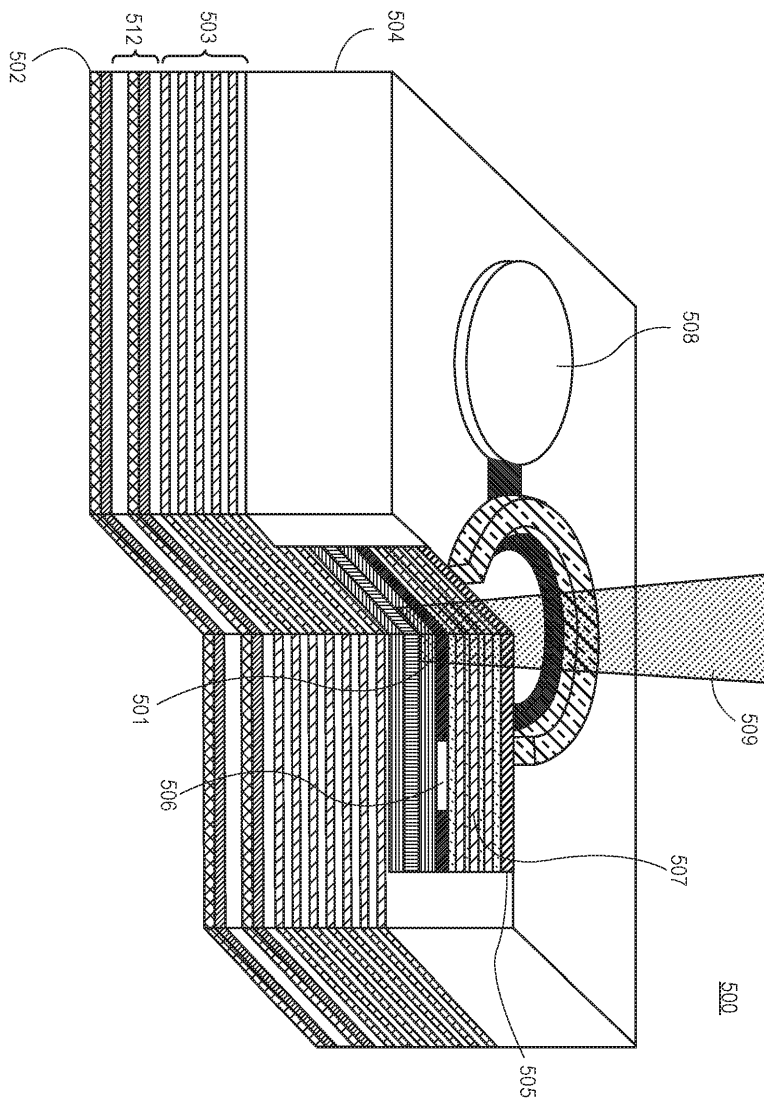
도면3c



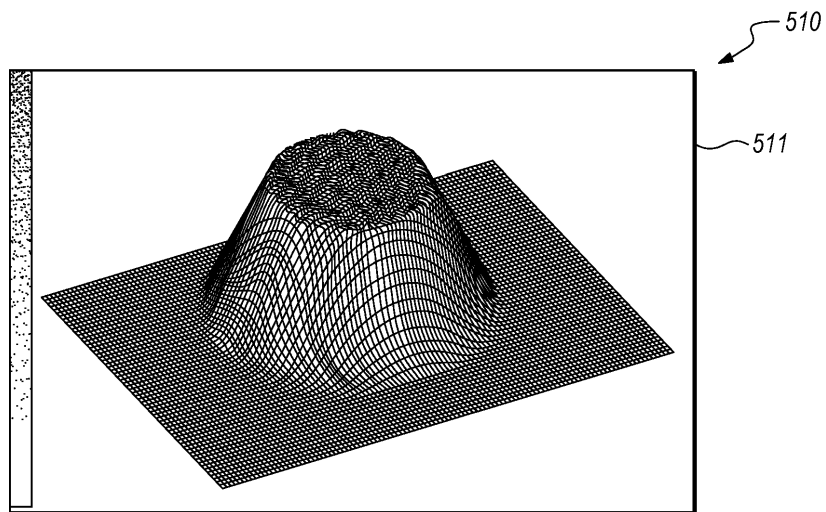
도면4



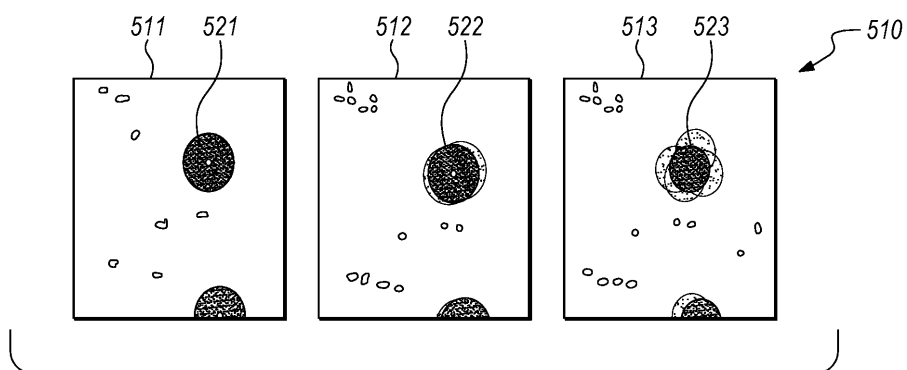
도면5a



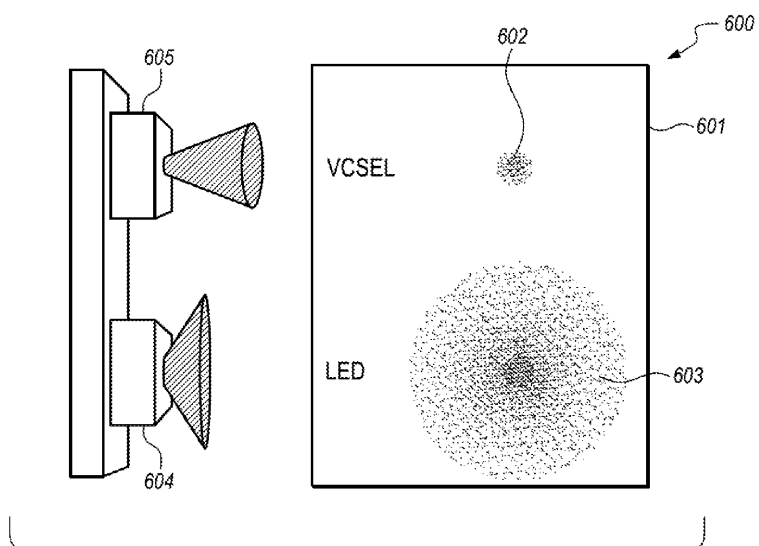
도면5b



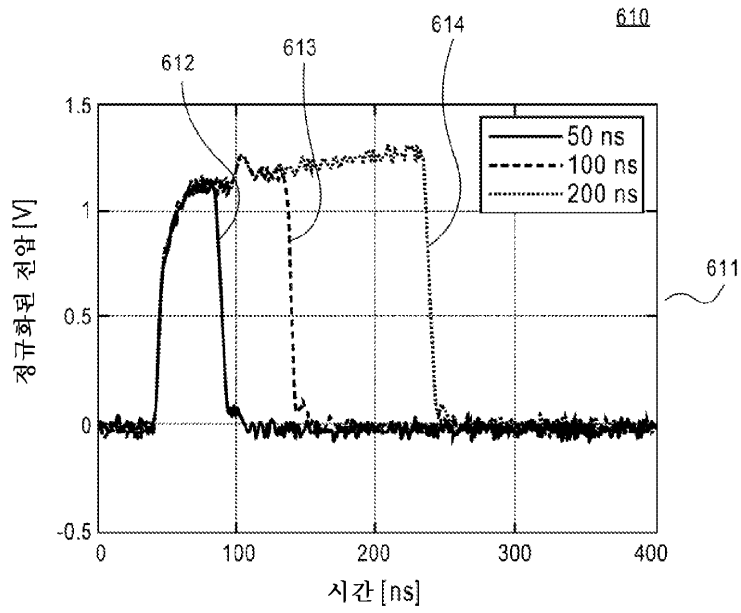
도면5c



도면6a



도면6b



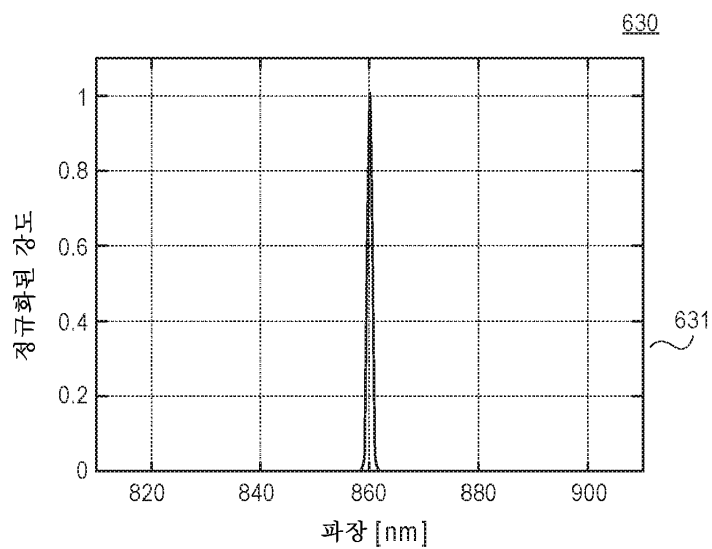
도면6c

620

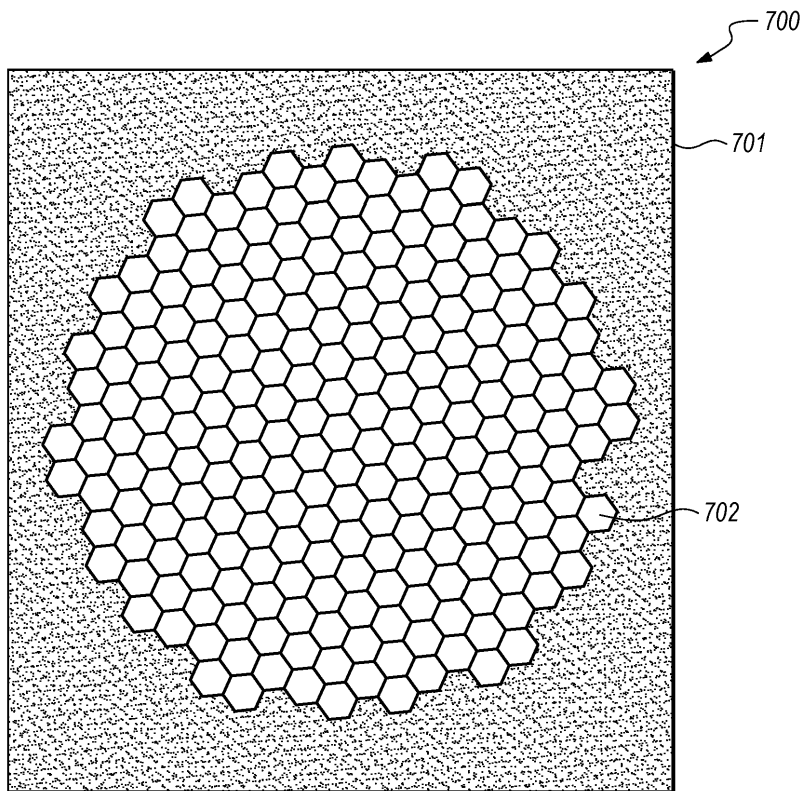
파라미터	시간 [ns]
상승 시간	19
하강 시간	7
지속기간 (50 ns)	43
지속기간 (100 ns)	93
지속기간 (200 ns)	193

621

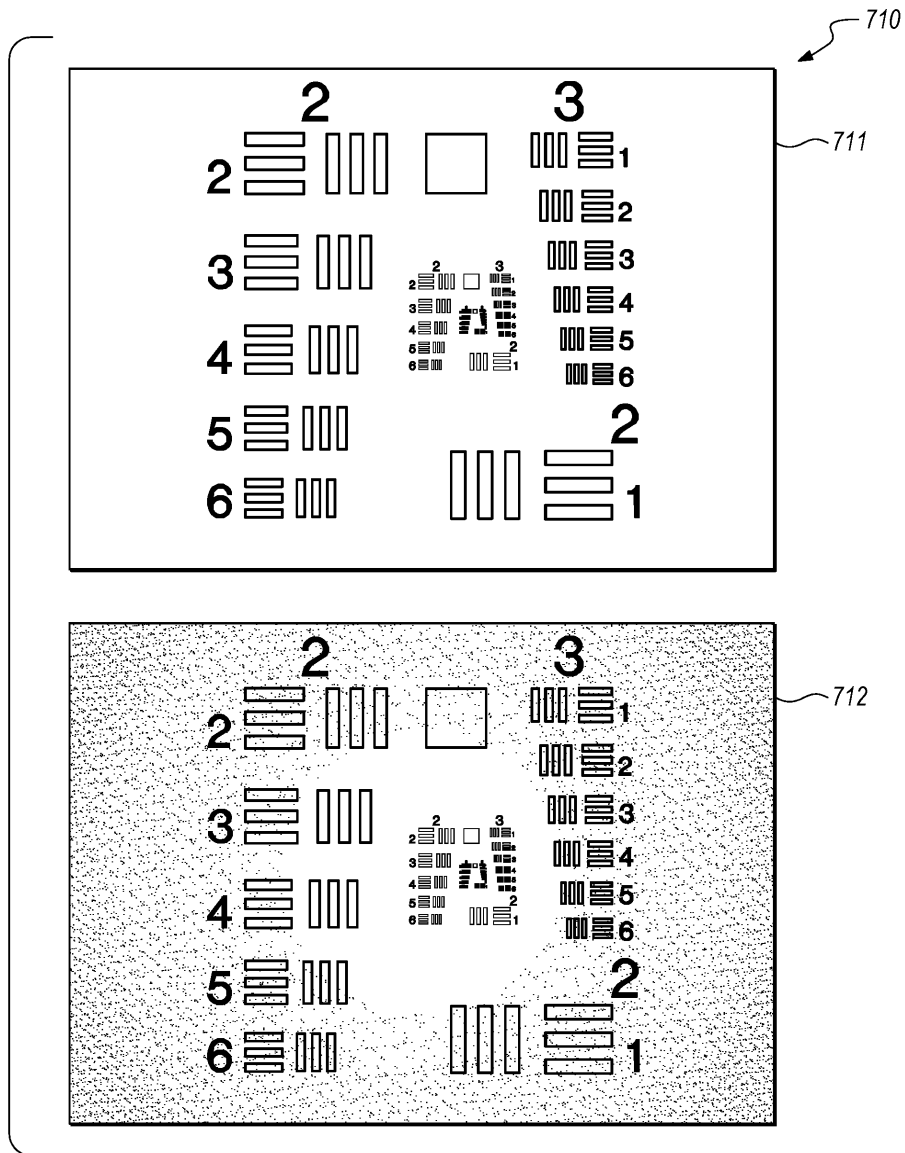
도면6d



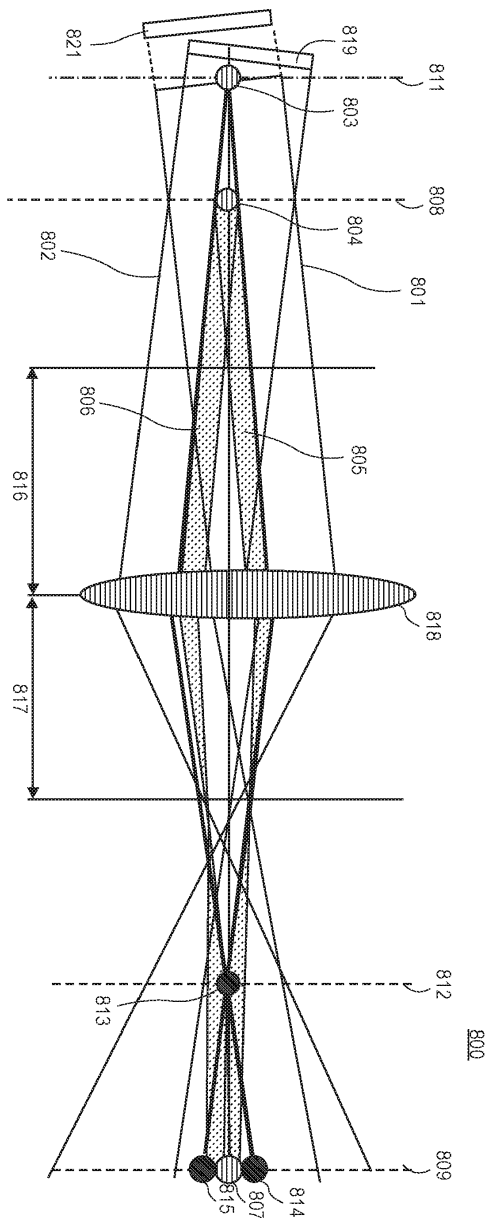
도면7a



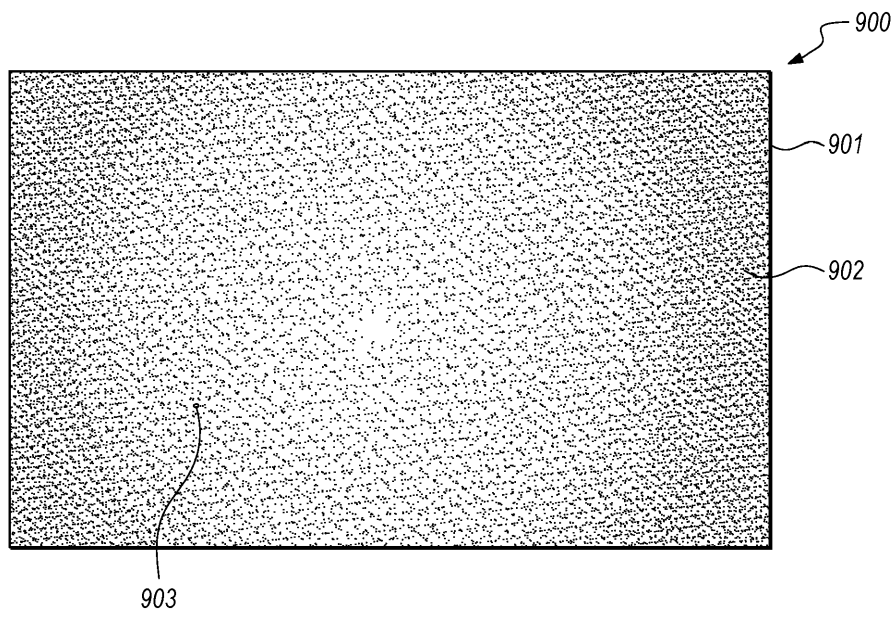
도면 7b



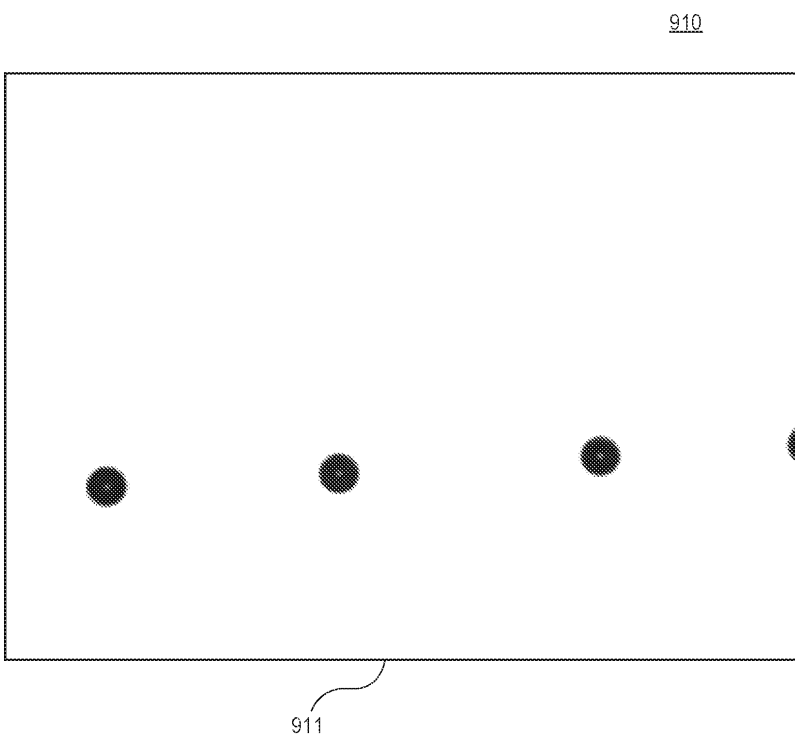
도면8



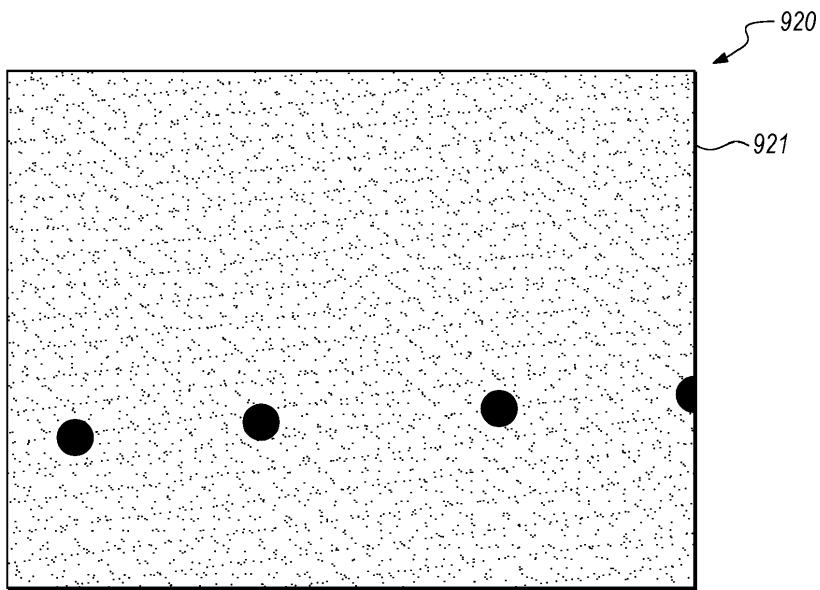
도면9a



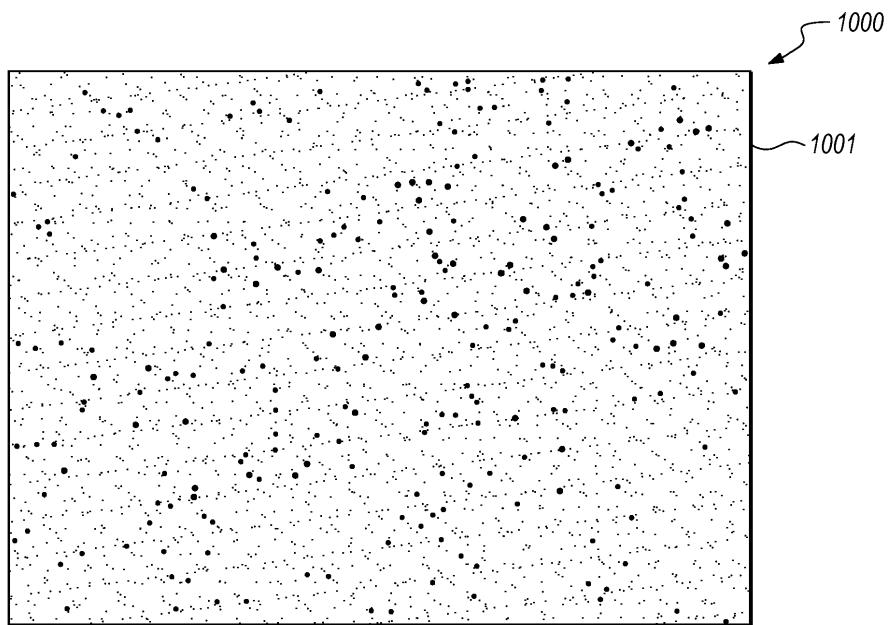
도면9b



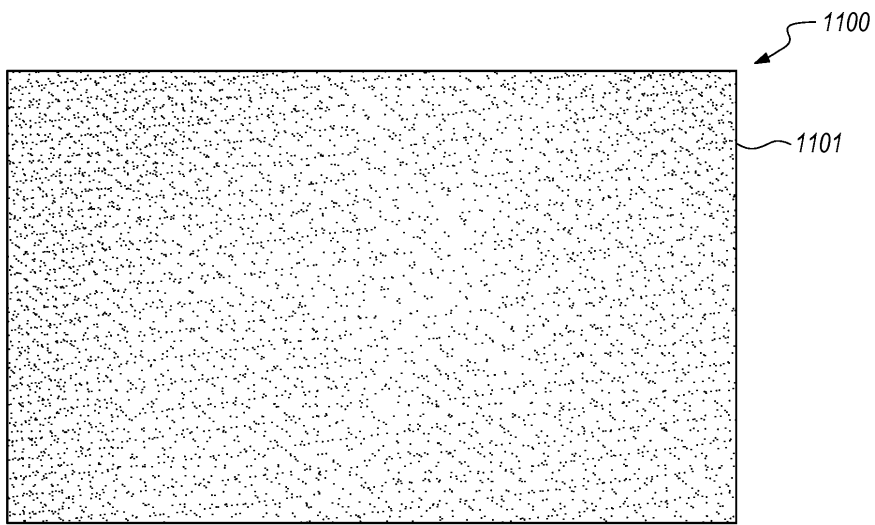
도면9c



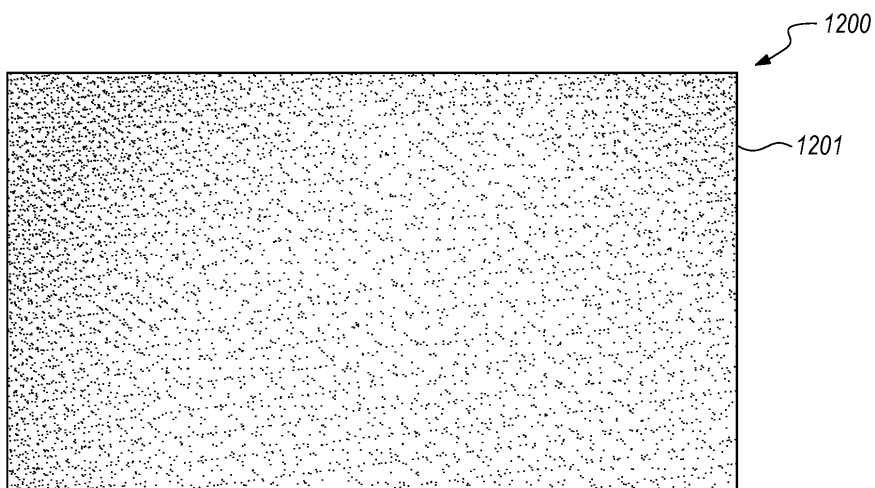
도면10



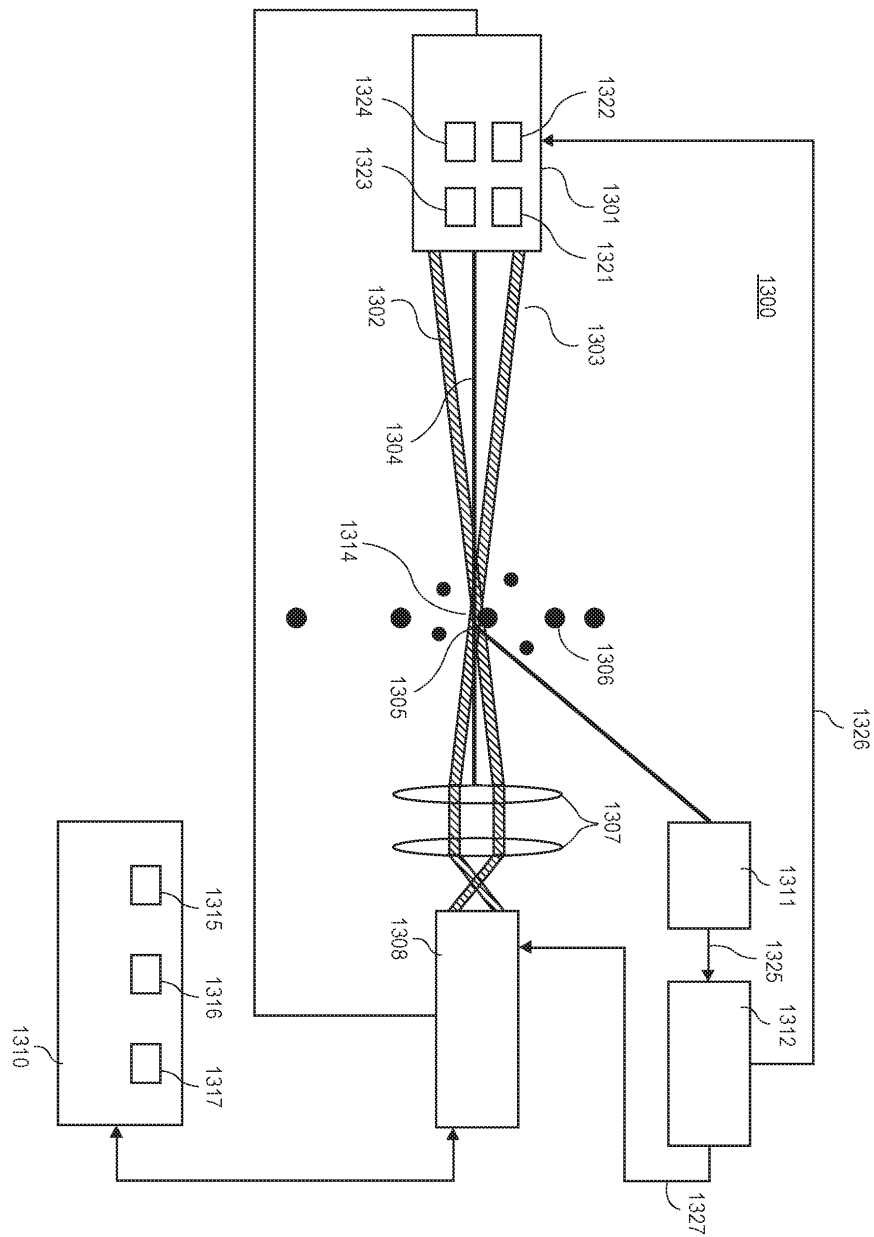
도면11



도면12

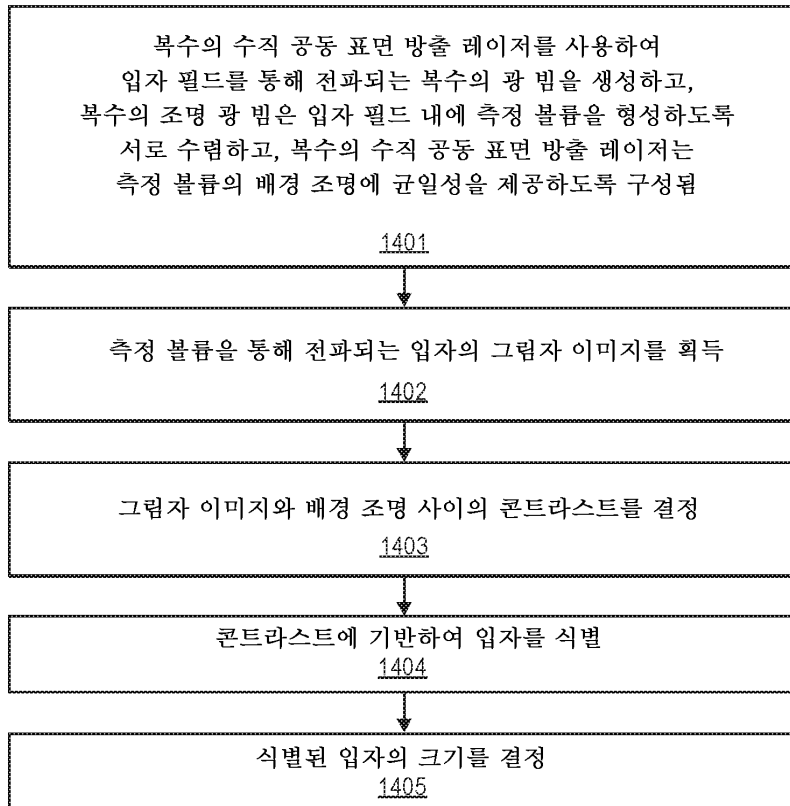


도면 13



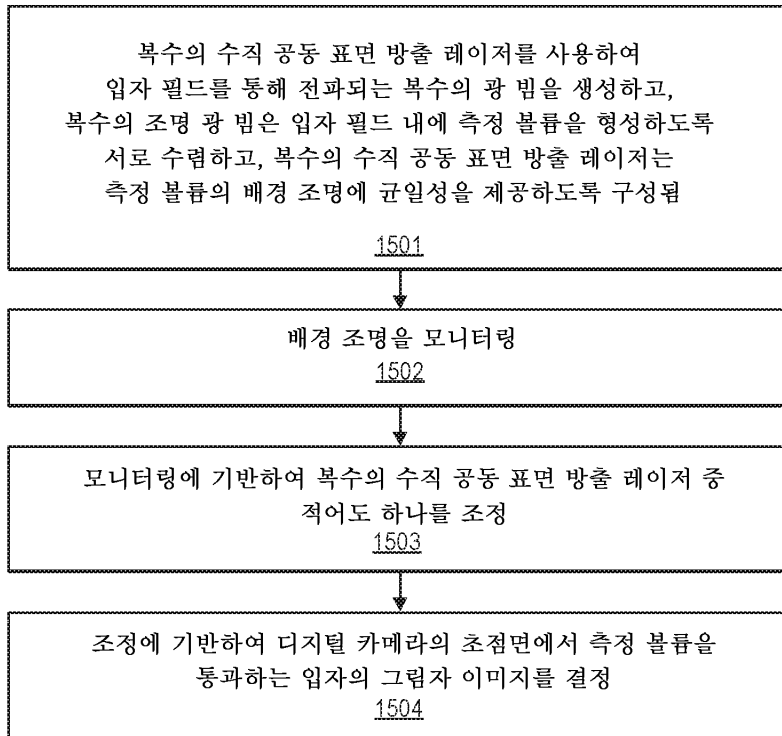
도면14

1400

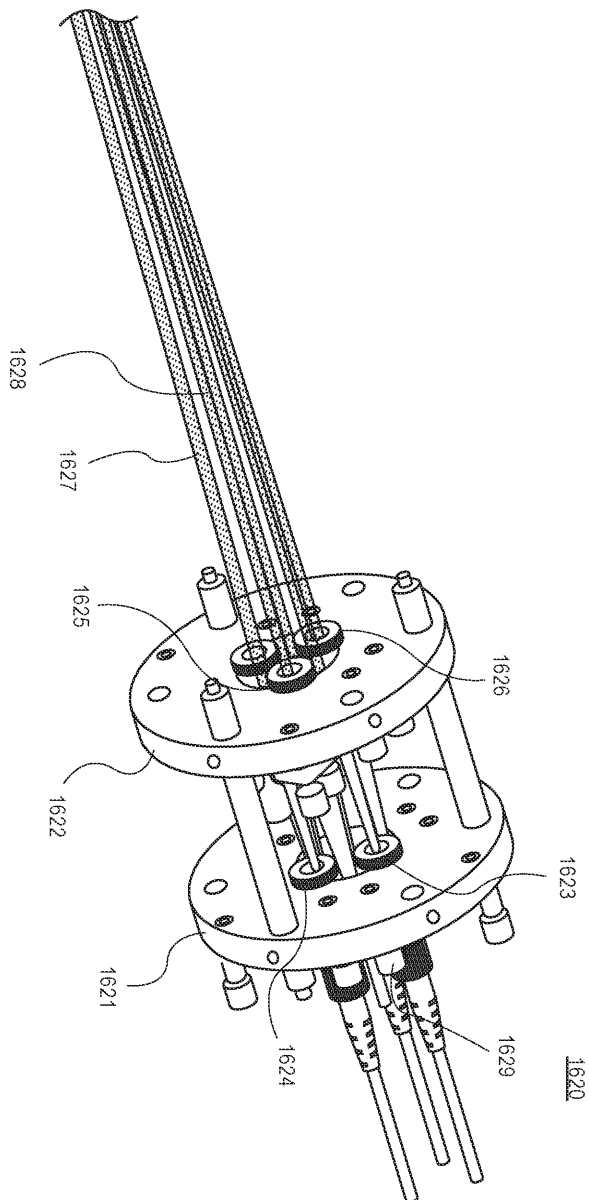


도면15

1500



도면16a



도면16b

