



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2013-0137642
(43) 공개일자 2013년12월17일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G02B 6/12 (2006.01) G02B 6/10 (2006.01)
- (21) 출원번호 10-2013-7011717
- (22) 출원일자(국제) 2011년10월07일
심사청구일자 없음
- (85) 번역문제출일자 2013년05월06일
- (86) 국제출원번호 PCT/US2011/055364
- (87) 국제공개번호 WO 2012/048220
국제공개일자 2012년04월12일
- (30) 우선권주장
61/391,193 2010년10월08일 미국(US)

- (71) 출원인
코넬 유니버시티
미국 뉴욕 14850 이타카 슈트 310 파인트리로드
395, 코넬 센터 포 테크놀로지, 엔터프라이즈 앤
커머셜리제이션("씨씨티이씨")
- (72) 발명자
에릭슨, 데이비드
미국 뉴욕 14850 이타카 이스트 마샬 스트리트
205
첸, 이-판
타이완 타이페이시 116 준공 로드 엘엔. 188 넘버
17, 9층
- (74) 대리인
이우영, 이은철, 전병기

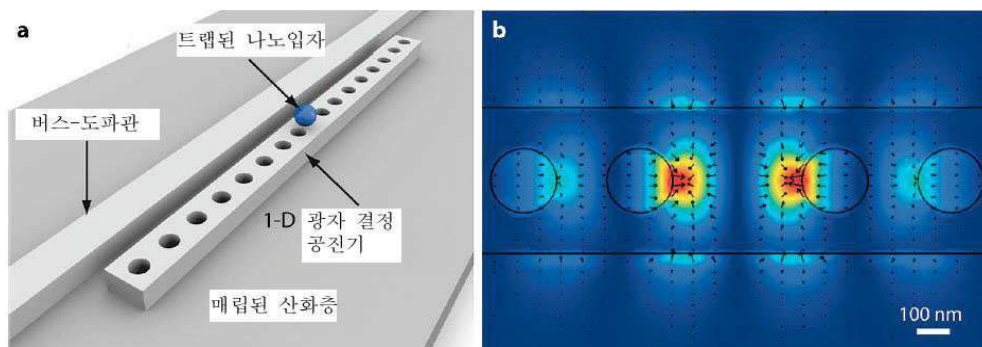
전체 청구항 수 : 총 23 항

(54) 발명의 명칭 **광 결정 공진기들을 이용한 광 트랩핑 장치, 방법들 및 응용들**

(57) 요약

복수의 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치들(a plurality of photonic crystal resonator optical trapping apparatuses) 및 상기 복수의 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치들을 이용한 복수의 광 트랩핑 방법들(a plurality of optical trapping methods)은, 기판 위에 위치되어 형성되고, 광자 결정 공진기와 결합된(즉, 개별적으로 결합되거나 통합적으로 결합되는) 광자 도파관(photonic waveguide)을 포함한다. 하나의 특별한 실시 예에서, 상기 광자 도파관과 상기 광자 결정 공진기는 어떤 화학적 기능화 없이 단결정 실리콘(monocrystalline silicon) (또는 다른) 광자 재료를 포함한다. 또 다른 특별한 실시 예에서, 상기 광자 도파관과 상기 광자 결정 공진기는 질화 실리콘(silicon nitride) 재료를 포함한다. 이것은, 상기 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치를 1064 나노미터 공진 광자 복사 파장(또는, 약 700 내지 약 1200 나노미터 범위의 다른 공진 광자 복사 파장)으로 작동시킬 때, 상기 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치에 의해 분석되는 수성 샘플 유체(aqueous sample fluid)의 인지할 수 있는 가열이 없다.

대표도 - 도1



특허청구의 범위

청구항 1

광 트랩핑 장치에 있어서,

기판 위에 위치된 광자 도파관; 및

상기 기판 위에 또한 위치되고 상기 광자 도파관과 결합된 광자 결정 공진기로서, 상기 광자 결정 공진기는 상기 광자 결정 공진기의 화학적 기능화 없이, 상기 광자 결정 공진기 내에 위치된 복수의 주기적인 구조들을 포함하는, 상기 광자 결정 공진기를 포함하는 상기 광 트랩핑 장치.

청구항 2

제 1 항에 있어서, 상기 광자 도파관은 상기 광자 결정 공진기와 개별적으로 결합되는, 상기 광 트랩핑 장치.

청구항 3

제 1 항에 있어서, 상기 광자 도파관은 상기 광자 결정 공진기와 통합적으로 결합되는, 상기 광 트랩핑 장치.

청구항 4

제 1 항에 있어서,

상기 광자 도파관 및 상기 광자 결정 공진기의 각각은 약 200 내지 약 500 나노미터의 두께를 가지고; 및,

상기 광자 도파관 및 상기 광자 결정 공진기의 각각은 약 200 내지 약 1000 나노미터의 선폭을 가지는, 상기 광 트랩핑 장치.

청구항 5

제 2 항에 있어서, 상기 광자 도파관은 상기 광자 결정 공진기로부터 약 50 내지 약 400 나노미터의 분리 거리만큼 분리되어 있는, 상기 광 트랩핑 장치.

청구항 6

제 1 항에 있어서, 상기 광자 도파관 및 상기 광자 결정 공진기의 각각은 단결정 실리콘 재료를 포함하는, 상기 광 트랩핑 장치.

청구항 7

광 트랩핑 장치에 있어서,

기판 위에 위치된 광자 도파관; 및

상기 기판 위에 또한 위치되고 상기 광자 도파관과 결합된 광자 결정 공진기로서, 상기 광자 결정 공진기는 상기 광자 결정 공진기 내에 위치된 복수의 주기적인 구조들을 포함하고 상기 광 트랩핑 장치에서 이용되는 샘플 유체에 의해 흡수되지 않는 공진 파장을 가지는 광자 재료를 포함하는, 상기 광자 결정 공진기를 포함하는 상기 광 트랩핑 장치.

청구항 8

제 7 항에 있어서,
상기 샘플 유체는 물을 포함하고;
상기 광자 재료는 질화 실리콘을 포함하고; 및
상기 공진 파장은 약 700 내지 약 1200 나노미터인, 상기 광 트랩핑 장치.

청구항 9

제 8 항에 있어서, 상기 공진 파장은 약 1064 나노미터인, 상기 광 트랩핑 장치.

청구항 10

제 7 항에 있어서, 상기 광자 도파관은 상기 광자 결정 공진기와 약 50 내지 약 400 나노미터의 분리 거리만큼 분리되어 있는 결합된, 상기 광 트랩핑 장치.

청구항 11

제 7 항에 있어서, 상기 광자 도파관은 상기 광자 결정 공진기와 통합적으로 결합되는, 상기 광 트랩핑 장치.

청구항 12

제 7 항에 있어서,
상기 광자 도파관 및 상기 광자 결정 공진기의 각각은 약 200 내지 약 500 나노미터의 두께를 가지고; 및,
상기 광자 도파관 및 상기 광자 결정 공진기의 각각은 약 200 내지 약 1000 나노미터의 선폭을 가지는, 상기 광 트랩핑 장치.

청구항 13

광 트랩핑 방법에 있어서,
광 트랩핑 장치를 제공하는 단계로서, 상기 광 트랩핑 장치는,
기관 위에 위치된 유체 채널;
상기 기관 위 및 상기 유체 채널 내에 또한 위치되는 광자 도파관; 및
상기 기관 위 및 상기 유체 채널 내에 또한 위치되고, 광자 공진기의 화학적 기능화 없이, 상기 광자 도파관과 또한 결합되는 상기 광자 결정 공진기를 포함하는, 상기 광 트랩핑 장치를 제공하는 단계,
상기 유체 채널에 입자 포함 유체를 도입하는 단계; 및
상기 광자 도파관 및 상기 광자 결정 공진기의 적어도 하나에서 상기 입자 포함 유체로부터 입자를 트랩하기 위해, 상기 광자 도파관에 공진 광자 복사(resonant photonic radiation)를 도입함으로써 상기 광 트랩핑 장치를 작동시키는 단계를 포함하는 상기 광 트랩핑 방법.

청구항 14

제 13 항에 있어서,

상기 광자 도파관 및 상기 광자 결정 공진기의 각각은 단결정 실리콘 재료를 포함하고;

상기 공진 광자 복사는 약 1550 나노미터의 파장을 가지는, 상기 광 트랩핑 방법.

청구항 15

제 13 항에 있어서, 상기 작동키는 단계는 상기 광자 도파관에서 상기 입자를 트랩하는, 상기 광 트랩핑 방법.

청구항 16

제 13 항에 있어서, 상기 작동키는 단계는 상기 광자 결정 공진기에서 상기 입자를 트랩하는, 상기 광 트랩핑 방법.

청구항 17

제 13 항에 있어서, 상기 작동키는 단계는 상기 광자 도파관 및 상기 광자 결정 공진기 모두에서 상기 입자를 순차적으로 트랩하는, 상기 광 트랩핑 방법.

청구항 18

광 트랩핑 방법에 있어서,

광 트랩핑 장치를 제공하는 단계로서, 상기 광 트랩핑 장치는,

기판 위에 위치된 유체 채널;

상기 기판 위 및 상기 유체 채널 내에 또한 위치되는 질화 실리콘 광자 도파관; 및

상기 기판 위 및 상기 유체 채널 내에 또한 위치되고, 상기 광자 도파관과 또한 결합되는 질화 실리콘 광자 결정 공진기를 포함하는, 상기 광 트랩핑 장치를 제공하는 단계,

상기 유체 채널에 입자 포함 유체를 도입하는 단계; 및

상기 입자 포함 유체를 감지할 수 있을 정도로 가열하지 않으면서 상기 광자 도파관 및 상기 광자 결정 공진기의 적어도 하나에서 상기 입자 포함 유체로부터 입자를 트랩하기 위해, 상기 광자 도파관에 공진 광자 복사(resonant photonic radiation)를 도입함으로써 상기 광 트랩핑 장치를 작동시키는 단계를 포함하는 상기 광 트랩핑 방법.

청구항 19

제 18 항에 있어서, 상기 작동시키는 단계는 약 700 내지 약 1200 나노미터 파장에서 상기 공진 광자 복사를 이용하는, 상기 광 트랩핑 방법.

청구항 20

제 18 항에 있어서, 상기 작동시키는 단계는 약 1064 나노미터 파장에서 상기 공진 광자 복사를 이용하는, 상기 광 트랩핑 방법.

청구항 21

제 18 항에 있어서, 상기 작동시키는 단계는 상기 광자 도파관에서 상기 입자를 트랩하는, 상기 광 트랩핑 방법.

청구항 22

제 18 항에 있어서, 상기 작동시키는 단계는 상기 광자 결정 공진기에서 상기 입자를 트랩하는, 상기 광 트랩핑 방법.

청구항 23

제 18 항에 있어서, 상기 작동시키는 단계는 상기 광자 도파관 및 상기 광자 결정 공진기에서 상기 입자를 순차적으로 트랩하는, 상기 광 트랩핑 방법.

명세서

기술 분야

[0001] 관련된 출원에 대한 상호 참조

[0002] 이 출원은 나노 조작 장치, 방법들 및 응용들(Nanomanipulation Apparatus, Methods and Applications)이라는 제목으로 2010년 10월 8일 출원된 가출원 일련 번호 61/391,193에 관련되고, 이로부터 우선권을 유도하는 출원이다. 그 내용은 참조로서 완전히 여기에 포함된다.

[0003] 정부 이익 선언(Statement of Government Interest)

[0004] 여기에서 기술된 연구는 (1) 프로젝트 ID 1R21EB009202로 국립보건원(National Institutes of Health); 및 (2) 보조금 번호 W911NF-07-1-0454로 에너지성(Department of Energy)의 자금 지원을 받았다. 미국 정부는 여기에서 청구된 주제(subject matter)에 관하여 어떤 권리들을 가지고 있다.

[0005] 발명의 분야

[0006] 실시 예들은 일반적으로 나노입자들의 광 트랩핑 조작(optical trapping manipulation of nanoparticles)에 관련된 것이다. 더 상세하게는, 실시 예들은 나노입자들의 효율적인 광 트랩핑 조작에 관한 것이다.

배경 기술

[0007] 나노입자들 및 소분자들(small molecules)의 조작은, 약물 디자인(drug design), 분자 진단법(molecular diagnostics), 질병 진단(disease diagnosis) 및 환경 샘플링(environmental sampling)를 포함하고, 여기에 제한되지 않는 다양한 분야들에서 영향들을 가지는 발전하고 있는 조사 및 기술 분야이다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0008] 나노입자 및 소분자 조작은 그 자체로 발전하고 있는 조사 및 기술 분야이고, 나노입자 및 소분자 나노조작(nanomanipulation)의 잠재적인 응용들이 또한 발전을 계속할 것이기 때문에, 나노입자 및 소분자 나노조작 장치 및 방법들의 효율적인 동작을 제공하는 추가적인 나노입자 및 소분자 조작 장치 및 방법들이 바람직하다.

과제의 해결 수단

[0009] 실시 예들은 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치들을 이용하여 나노입자들 및 소분자들의 광 트랩핑을 위한 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치들(photonic crystal resonator optical trapping apparatuses)을 포함한다. 실시 예들에 따른 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치들은 광자 결정 공진기들을 제공하는 어떤 몇몇 주기적인 나노구

조들(즉, 전형적으로 그러나 배타적으로 유전체 또는 금속-유전체 나노구조들(dielectric or metallo-dielectric nanostructures)이 아닌)을 포함하는 어떤 몇몇 광자 결정 재료들(photonic crystal materials)을 포함할 수 있다. 추가로, 실시 예들에 따른 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치들은 개별적으로 결합된 광자 도파관(a separately coupled photonic waveguide)(즉, 여기에서 광자 도파관과 광자 결정 공진기는 어떤 분리 거리(a separation distance)만큼 분리된다), 또는 대안적으로 통합적으로 결합된 광자 도파관(an integrally coupled photonic waveguide) (즉, 통합 광자 도파관은 광자 결정 공진기에 대하여 광자 도파관의 어떤 분리 거리를 포함하지 않는다)을 포함할 수 있다.

[0010] 제1의 특별한 실시 예에서, 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치는, 각각 어떤 화학적인 기능화 없이(absent any chemical functionalization), 실리콘(silicon) 광자 도파관과 실리콘 광자 결정 공진기를 포함한다. 제2의 특별한 실시 예에서, 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치는, 어떤 수용액(aqueous solution)의 인지할 수 있는 가열(heating) 없이 그 수용액 내에서 광 트랩핑을 제공하는 질화 실리콘 통합 광자 도파관(silicon nitride integral photonic waveguide)과 질화 실리콘 통합 광자 결정 공진기(silicon nitride integral photonic crystal resonator)를 포함한다. 이것은 상기 통합된 질화 실리콘 광자 도파관과 상기 통합된 질화 실리콘 광자 결정 공진기가, 실리콘 광자 도파관과 실리콘 광자 결정 공진기와 함께 전형적으로 이용되어 수용액을 인지할 수 있도록 가열하는 약 1550 나노미터의 파장에서보다 약 1064 나노미터의 파장에서(또는 대안적으로 약 700 내지 약 1200 나노미터의 범위, 더 바람직하게는 약 750 내지 850 나노미터의 범위에서, 또는 대안적으로 더 바람직하게는 약 960 내지 1070 나노미터의 범위에서. 여기에서 앞에서 말한 더 바람직한 범위들은 물의 의한 복사 흡수(radiation absorption)와 또한 생물학적 셀 광손상(biological cell photodamage)을 모두 고려한다) 광 복사(optical radiation)를 전송하도록 이용될 수 있기 때문이다.

[0011] 상기 실시 예들에 따른 특별한 광 트랩핑 장치는 기판 위에 위치한 광자 도파관을 포함한다. 이 특별한 광 트랩핑 장치는 또한, 상기 기판 위에 또한 위치되고 상기 광자 도파관과 결합된 광자 결정 공진기를 포함한다. 이 광자 결정 공진기는, 상기 광자 결정 공진기의 화학적 기능화 없이, 상기 광자 결정 공진기내에 위치한 복수의 주기적 구조들(a plurality of periodic structures)을 포함한다.

[0012] 상기 실시 예들에 따른 또 다른 특별한 광 트랩핑 장치는 기판 위에 위치한 광자 도파관을 포함한다. 이 다른 특별한 광 트랩핑 장치는 또한 상기 기판 위에 또한 위치되고 상기 광자 도파관과 결합된 광자 결정 공진기를 포함한다. 이 광자 결정 공진기는 상기 광자 결정 공진기내에 위치한 복수의 주기적 구조들(a plurality of periodic structures)을 포함하고, 상기 광 트랩핑 장치에서 이용되는 샘플 유체(sample fluid)에 의해 흡수되지 않는 공진 파장(resonant wavelength)을 가지는 광자 재료(photonic material)를 포함한다.

[0013] 상기 실시 예들에 따른 특별한 광 트랩핑 방법은 (1) 기판 위에 위치한 유체 채널(fluid channel); (2) 상기 기판 위 및 상기 유체 채널 내에 또한 위치되는 광자 도파관; 및 (3) 상기 기판 위 및 상기 유체 채널 내에 또한 위치되고, 광자 공진기의 화학적 기능화 없이, 상기 광자 도파관과 또한 결합되는 광자 결정 공진기를 포함하는 광 트랩핑 장치를 제공하는 단계를 포함한다. 이 특별한 방법은 또한 상기 유체 채널에 입자 포함 유체(particle containing fluid)를 도입하는 단계를 포함한다. 이 특별한 방법은 또한 상기 광자 도파관 및 상기 광자 결정 공진기의 적어도 하나에서 상기 입자 포함 유체로부터 입자를 트랩하기 위해, 상기 광자 도파관에 공진 광자 복사(resonant photonic radiation)를 도입함으로써 상기 광 트랩핑 장치를 작동시키는 단계를 포함한다.

[0014] 상기 실시 예들에 따른 또 다른 특별한 광 트랩핑 방법은 (1) 기판 위에 위치한 유체 채널; (2) 상기 기판 위 및 상기 유체 채널 내에 또한 위치되는 질화 실리콘(silicon nitride) 광자 도파관; 및 (3) 상기 기판 위 및 상기 유체 채널 내에 또한 위치되고, 상기 광자 도파관과 또한 결합되는 질화 실리콘 광자 결정 공진기를 포함하는 광 트랩핑 장치를 제공하는 단계를 포함한다. 이 특별한 방법은 또한 상기 유체 채널에 입자 포함 유체를 도입하는 단계를 포함한다. 이 특별한 방법은 또한 상기 입자 포함 유체를 감지할 수 있을 정도로 가열하지 않으면서 상기 광자 도파관 및 상기 광자 결정 공진기의 적어도 하나에서 상기 입자 포함 유체로부터 입자를 트랩하

기 위해, 상기 광자 도파관에 공진 광자 복사(resonant photonic radiation)를 도입함으로써 상기 광 트랩핑 장치를 작동시키는 단계를 포함한다.

[0015] 본 공개 명세 내에서, 특히 뒤따르는 청구항들 내에서, 제 2 층 또는 구조에 대하여 제 1 층 또는 구조의 위치 또는 위치시킴과 관련하여 "위에(over)"라는 기술용어를 사용하는 것은 상기 층들 또는 구조들 중 하나가 상기 층들 또는 구조들 중 다른 하나에 대하여(즉, 평행한 베이스 평면에 대하여)기관 위쪽에 있다는 것을 의미하는 것을 의도한다. 대비적으로, 제 2 층 또는 구조에 대하여 제 1 층 또는 구조의 위치 또는 위치시킴과 관련하여 "상에(upon)"라는 기술용어를 사용하는 것은 상기 특정 층들 또는 구조들 사이에 상기 특별한 위에 있는 관계(the particular overlying relationship)뿐만 아니라 그렇게 지정된 상기 특별한 제 1 층 또는 구조 및 상기 특별한 제 2 층 또는 구조 사이의 접촉을 또한 의미하는 것을 의도한다.

발명의 효과

[0016] 상기와 같은 본 발명에 따르면, 본 발명은 적외선 근처 또는 가시 파장에서 동작하는 질화 실리콘 광자 결정 공진기들은 많은 열을 발생시키지 않고 높은 광 트랩핑 강도를 제공할 수 있다. 이렇게 상당히 감소된 열 발생은 트랩된 바이오분자들이 정상적으로 기능할 수 있고 흐름 체임버에서 바이오분자들의 운반이 열적 효과들에 의해 영향을 받지 않는다.

[0017] 또한, 본 발명에 따른 질화 실리콘 광자 결정 공진기들은, 너무 작아서 단일-분자 연구들을 위한 다른 광 트랩핑 기법들을 이용하여 쉽게 트랩될 수 없는 작은 바이오분자들을 트랩하기 위해 이용될 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0018] 실시 예들의 목적, 특징, 이점들은 이하에서와 같이 실시 예들의 상세한 설명의 맥락 내에서 이해된다. 실시 예들의 상세한 설명은 본 공개 명세의 실질적인 부분을 형성하는 수반하는 도면들의 맥락 내에서 이해된다.

도 1은 (1) 제 1 실시 예에 따라, 기관 위에 위치되고 개별적으로 결합된 실리콘 광자 도파관과 실리콘 광자 결정 공진기를 포함하는 공진하는 광 트랩핑 장치의 도해 투시도; 및 (2) 제 1 실시 예에 따라 상기 개별적으로 결합된 실리콘 광자 도파관과 실리콘 광자 결정 공진기를 포함하는 상기 공진하는 광 트랩핑 장치의 광 필드 동작(optical field operation) 3차원 시뮬레이션을 보여준다.

도 2는 제 1 실시 예에 따른 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치의 스캐닝 전자 현미경 관찰(SEM; scanning electron microscopy) 이미지를 보여준다.

도 3은 제 1 실시 예에 따른 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치 상에서 나노입자의 트랩핑 및 방출(trapping and release)에 있어서 점진적인 프로세스 단계들의 결과들을 보여준다.

도 4는 제 1 실시 예에 따른 (1) 광자 결정 공진기 상으로 입자 트랩핑 및 광자 도파관 상으로 방출; 및 (2) 광자 결정 공진기 상으로 입자 트랩핑 및 유체 흐름(fluid flow)으로 방출을 보여주는 일련의 평면에서 본 다이어그램들이다.

도 5는 제 1 실시 예에 따른 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치 내에서 트랩핑 힘들(trapping forces)의 수치 분석에 관련된, X, Y, Z 방향들에서 트랩핑 힘(Trapping Forces) 대(versus) X, Y, Z 방향들에서 입자 위치(Particle Position)(즉, 도 5a, 도 5b 및 도 5c) 및 입자 크기의 함수로서 Z 방향에서의 트랩핑 힘(즉, 도 5d)의 일련의 그래프들을 보여준다.

도 6은 제 1 실시 예에 따른 트랩된 나노입자들에 대한 브라운 운동 억제(Brownian motion suppression) 및 트랩핑 강도 결정에 관련된, 일련의 이미지들(즉, 도 6a에서 브라운 운동 이미지들), 도 6b에서 전력 대 시간(Power versus Time) 그래프(즉, 입자 방출을 예시함) 및 도 6c 및 도 6d에서 히스토그램(트랩핑 강도(trapping stiffness)를 평가하기 위함)을 보여준다.

도 7은 제 1 실시 예에 따른 나노입자들에 대한 브라운 운동 억제 및 트랩핑 강도 결정에 관련된, X, Y 방향들에서의 트랩핑 힘 대 위치의 그래프 쌍을 보여준다.

도 8은 제 2 실시 예에 따른 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치의 일련의 도해 평면 방향 및 투시 다이어그램들을 보여준다.

도 9는 제 2 실시 예에 따른 질화 실리콘 광자 결정 공진기 상에 형광 폴리머(fluorescent polymer) 나노입자 트랩핑을 예시하는 일련의 이미지들을 보여준다.

도 10은 제 2 실시 예에 따른 질화 실리콘 광자 결정 공진기 상에 양자 점(quantum dot) 및 윌슨병 단백질(Wilson disease protein) 트랩핑을 예시하는 일련의 이미지들을 보여준다.

도 11은 제 2 실시 예에 따른 질화 실리콘 광자 결정 공진기 상에 트랩된 22 나노미터 폴리에스티렌 폴리머 나노입자(22 nanometer polystyrene polymer nanoparticle)의 브라운 운동에 관한 카운트들(Counts) 대 X-변위(X-Displacement)(도 11a) 및 Y-변위(Y-Displacement) (도 11b)의 그래프들을 보여준다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0019] 비제한적인 예시적인 실시 예들은, 광자 결정 공진기 내 광 트랩핑 필드(optical trapping field)의 증폭에 의해 트랩 강도(trap stiffness)를 동시에 향상시키면서 3차원에서 향상된 광 필드 그레이디언트들(enhanced optical field gradients)을 발생시킬 수 있는 여러 종류의 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치를 제공하여, 고급 입자 처리 및 광 트랩핑 나노조작 기능들(advanced particle handling and optical trapping nanomanipulation functionalities)을 가능하게 한다. 실시 예들에 따른 특별한 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치는 단결정(monocrystalline) 실리콘 재료들로부터 만들어지거나, 또는 대안적으로 질화(silicon nitride) 실리콘 재료들(이들은 일반적으로 단결정이나 다결정(polycrystalline)이 아니라 오히려 일반적으로 비정질(amorphous)이다)로 만들어질 수 있다. 다른 재료들이 예시적인 비제한적인 실시 예들에 따른 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치를 만드는데 불가능하지는 않다.

[0020] 실시 예들에 따른 특별한 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치는 결합된 광자 도파관(즉, 개별적으로 결합된 광자 도파관 또는 통합적으로 결합된 광자 도파관)이나 광자 결정 공진기의 화학적 기능화(chemical functionalization)를 이용하지 않는다. 오히려 화학적 기능화 없이 상기 결합된 광자 도파관 및 상기 광자 결정 공진기 중 적어도 하나의 물리적 근접 필드 광 트랩핑 특성들(physical near field optical trapping characteristics)에 의존한다. 실시 예들에 따른 추가의 특별한 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치는, 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치에 의해 분석될 수 있는 유체에 의해 인식할 수 있을 정도로 흡수되지 않는 파장에서 광 공진성(optical resonance)을 제공하도록 광자 도파관과 광자 결정 공진기의 구성의 재료들의 선택을 제공한다. 이것은 상기 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치에 의해 분석될 수 있는 유체가 상기 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치에 의해 분석될 때 인식할 수 있을 정도로 가열되지 않도록(즉, 약 섭씨 1도(1 degree centigrade) 이하의 온도 상승) 하려는 것이다.

[0021] I. 단결정 실리콘 재료들로 제조된, 개별적으로 결합된 광자 도파관에 기초한 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치 (Separately Coupled Photonic Waveguide Based Photonic Crystal Resonator Optical Trapping Apparatus Fabricated From Monocrystalline Silicon Materials)

[0022] 도 1a에 예시된 바와 같이, 제 1 실시 예에 따른 특별한 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치는 기판(이 기판의 상부 표면은 실리콘-온-절연체(silicon-on-insulator) 기판 내에 매립된 산화 층(a buried oxide layer)을 포함한다) 위에 위치 및 형성되어, 단일 모드 실리콘 버스 광자 도파관(single mode silicon bus photonic waveguide)에 극미세하게 결합된 1차원 실리콘 광자 결정 공진기를 포함한다. 상기 공진 광 트랩핑 장치의 상기 실리콘 광자 결정 공진기 내의 공진하는 광 필드의 정상파 성질(standing wave nature)은 모든 3차원들에서 강한 필드 가둠(strong field confinement)으로 참된 정적 포인트 트랩(a true static point trap)을 가능하게 한다.

[0023] 전형적인 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치의 스캐닝 전자 현미경 관찰(SEM) 이미지가 도 2에 보여진다. 그러한 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치의 제조 과정은 이하에서 좀더 상세하게 제공된다. 일반적으로 상기 단일 모드 실리콘 버스 광자 도파관 및 상기 1차원 실리콘 광자 결정 공진기의 각각은 실리콘-온-절연체 기판 내에 표면 실리콘 층으로부터 패터닝되고(patterned), 약 200 내지 약 500 나노미터의 두께(thickness), 약 200 내지 약 1000 나노미터의 선폭(linewidth) 및 약 50 내지 약 400 나노미터의 분리 거리(separation distance)를 가진다. 더욱이, 상기 1차원 실리콘 광자 결정 공진기는 약 2 내지 약 10 마이크론의 길이(length)를 가지고, 상

기 1차원 실리콘 광자 결정 공진기의 상부 표면(top surface)을 관통하여 위치되고 형성된 약 6 내지 30개의 애퍼처들(apertures)(즉, 상기 광자 결정 공진기를 제공하고 전형적으로 구멍들을 포함하는 주기적인 구조들)을 포함한다. 이 애퍼처들은 전형적으로 약 50 내지 약 400 나노미터의 직경(diameter)을 가지고, 일정한 사이즈이거나(sizes) 또는 일정치 않은 사이즈이다. 약 10 내지 약 100 나노미터의 더 작은 사이즈의 애퍼처 또는 구멍이 나머지 애퍼처들에 관하여 유의하도록 중심에 위치될 수 있다.

[0024] 도 1b(여기에서 화살표는 국부 광 힘들(local optical forces)의 방향 및 크기를 나타낸다)에 예시된 바와 같이, 공진 과정에서 광(즉, 광자 복사(photonic radiation))이 상기 실리콘 버스 광자 도파관에 결합될 때, 상기 실리콘 광자 결정 공진기 내에 정지 간섭 패턴(stationary interference pattern)이 형성되어 극히 작은 볼륨에(in an extremely small volume)에 광 필드의 강한 가둠(tight confinement)을 결과적으로 가져온다. 상기 실리콘 광자 결정 공진기 내의 광 필드의 공진 증폭(resonant amplification)과 결합된 이들 강한 필드 그레이디언트들(strong field gradients)은 약 50 내지 500 nm 사이즈 범위의 나노입자들의 안정적 트랩핑을 가능(stable trapping)하게 한다.

[0025] 도 3은 제 1 실시 예에 따른 단결정 실리콘에 기초한 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치에 관련하여 62 nm 폴리스티렌(polystyrene) 나노입자(굴절률 $n=1.50$)의 트랩핑과 방출을 예시하는 일련의 형광 현미경 관찰 이미지들을 보여준다. 상기 62 nm 폴리스티렌 나노입자는 일반적으로, 대안적인 부동화 접근법들(alternative immobilization approaches)을 이용하여 그럴듯하게 트랩될 수도 있는 입자의 사이즈 한계 이하라는 것을 유의한다. 도 3의 이미지들에 관하여, 튜닝 가능한 적외선 레이저(tunable infrared laser)가 렌즈형 섬유(lensed fiber)를 이용하여 실리콘 결정 버스 광자 도파관(silicon crystal bus photonic waveguide)의 입력단에 1548.15 nm의 공진 파장에서 TE 분극된 광(TE polarized light)을 결합하도록 이용된다. 상기 실리콘 결정 버스 광자 도파관에서 출력 전력은 1.7 mW로 측정되었다. 앞에서 말한 실험의 맥락 내에서, 마이크로 유체 흐름(microfluidic flow)이 채널을 따라 실리콘 광자 결정 공진기를 향하여 입자들을 대류시킨다(convect). 후보 입자가 실리콘 광자 결정 공진기 표면의 가까운 부근 내 및 상기 공진 광 필드 로브(resonant optical field lobes)를 통과하면, 이 후보 입자는 강한 국부 필드 그레이디언트에 의해 인발력(tweezing force)을 경험하고, 그 결과 입자가 상기 실리콘 광자 결정 공진기 표면에서 트랩된다. 트랩된 입자는 레이저 전력을 턴오프(turn off)함으로써 이어서 방출된다(상기 62 nm의 경우에 대해 도 3에 도시된 바처럼). 트랩된 입자들은 또한 공진 파장으로부터 떨어진 입력 파장을 디튜닝(detuning)함으로써 또는 광의 분극을 TE에서 TM으로 스위칭함으로써 방출될 수 있다.

[0026] 적어도 제 1 실시 예에 따른 상기 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치 설계의 흥미로운 양상은 실리콘(또는 아마도 다른 광자 자료) 버스 광자 도파관 내로 가이드된 광 모드(guided optical mode)가 그 표면을 따라 나노입자들의 동시적인 트랩핑 및 추진(simultaneous trapping and propulsion)을 가능하게 하는 순방향 운동량(forward momentum)을 가진다는 것이다. 대비적으로, 공진에서, 실리콘 광자 결정 공진기 내 필드는 진행 성분(propagation component) 없이 강하게 가두어진 정상파(tightly confined standing wave)로 이루어진다. 이와 같이 마이크로 유체 흐름을 맞추고(tailoring) 상기 실리콘 버스 광자 도파관 및 상기 1차원 실리콘 광자 결정 공진기 내의 광 필드의 이러한 대비적인 성질을 이용함으로써, 입자 조작들을 수행하기 위한 새로운 기술이 시연될 수 있다).

[0027] 도 4는 제 1 실시 예에 따른 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치를 이용하는 동안 500 nm 폴리스티렌 마이크로 구들(microspheres)의 트랩핑 및 조작을 시연하는 일련의 시간 경과 형광 현미경 관찰 이미지들을 예시한다. 도 4의 상부 패널(top panel)에서(즉, 도 4a), 마이크로 유체 채널에서의 흐름은 왼쪽에서 오른쪽이다. 500 nm 폴리스티렌 마이크로 구가 상기 가이드된 광 모드의 에버네스cent 필드(evanescent field)에 의해 상기 실리콘 버스 광자 도파관을 따라 트랩 및 운반된다. 상기 입력 광은 처음에 공진 파장으로 튜닝된다. 결과로서, 입자가 상기 실리콘 버스 광자 도파관을 따라 움직여 상기 실리콘 광자 결정 공진기에 접근할 때, 상기 입자는 상기 실리콘 광자 결정 공진기 중심을 향하여 측면 인발력(lateral tweezing force)을 경험한다. 상기 실리콘 광자 결정 공진기 내 필드 증폭 및 상기 실리콘 광자 결정 공진기에서의 더 강한 필드 그레이디언트들에 의해, 상기 입자가

경험하는 측면 인발력은 상기 실리콘 버스 광자 도파관에 의해 가해진 트랩핑 힘보다 훨씬 강하다. 그 결과 상기 입자는 상기 실리콘 버스 광자 도파관으로부터 상기 실리콘 광자 결정 공진기 중심으로 hopping한다. 일단 트랩되면, 상기 입자는 상기 실리콘 광자 결정 공진기 상에 정지 상태로 유지된다. 상기 입자를 다시 상기 실리콘 버스 광자 도파관으로 방출하기 위해서, 상기 실리콘 버스 광자 도파관 입력 파장은 공진으로부터 멀어지도록 튜닝될 수 있다. 이것은 상기 실리콘 광자 결정 공진기 트랩으로부터 입자를 방출하고, 상기 입자는 상기 실리콘 버스 광자 도파관을 향하여 상기 유체 흐름과 함께 대류된다(convected). 상기 실리콘 버스 광자 도파관은 파장 선택적(wavelength selective)이 아니므로, 그것이 상기 실리콘 버스 광자 도파관의 표면 위를 통과할 때 상기 오프-공진 가이드된 광 모드(off-resonant guided optical mode)의 에버네스트 필드가 상기 입자를 재트랩한다(retrap). 일단 상기 입자가 상기 실리콘 버스 광자 도파관에 트랩되면, 이어서 그것은 상기 실리콘 버스 광자 도파관을 따라 추가로 운반된다. 상기 마이크로채널에서 유체 흐름의 방향이 역전될 때(도 4b), 상기 실리콘 광자 결정 공진기 상의 상기 트랩된 입자는 입력 레이저가 공진 턴오프될 때 상기 유체 흐름 내로 리젝트(reject)될 수 있다.

[0028] 제 1 실시 예에 따른 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치 내에서 모든 3차원원에서 최대 트랩핑 힘(maximum trapping force)과 함께 트랩핑 강도(trapping stiffness)를 특징화하기 위하여, 상세한 3차원 유한 요소 수치 분석(a detailed 3-dimensional finite element numerical analysis)이 상용 소프트웨어 패키지(commercial software package)(COMSOL)를 이용하여 이루어졌다. 공진에서 전자기 필드 분포를 해석하는(solve) 동안, 상기 실리콘 광자 결정 공진기와 유체 채널 내 주위 물 매체(surrounding water medium)의 재료 특성들이 고려되었다. 입자에 가해진 힘을 결정하기 위해, 상기 입자를 둘러싸는 가상 구 표면(a virtual spherical surface)이 구성되고, 표면상에서 전자기 필드가 계산되었다. 시간-독립 맥스웰 스트레스 텐서(time-independent Maxwell stress tensor)를 평가하고 이것을 상기 입자를 둘러싸는 상기 폐표면(closed surface)에 걸쳐 적분함으로써, 다양한 방향들에서 트랩핑 힘을 얻을 수 있다.

[0029] 도 5a, 도 5b 및 도 5c는 1W의 입력 광 트랩핑 전력에 대해 안정된 트랩핑 위치로부터 모든 3차원에서 변위된 100 nm 폴리스티렌 마이크로 구에 대한 트랩핑 힘 프로파일을 예시한다. 100 nm 입자에 대한 최대 트랩핑 힘은 Z 방향에서 700 pN임(도 5c에 예시된 바와 같이 실리콘 광자 결정 공진기 표면으로부터 25 nm에서 평가되었다)을 관찰할 수 있다. 입자가 실리콘 광자 결정 공진기 표면에 대해 25 nm 보다 더 가까울 때, 수치적 메시 한계들(meshing limitations)과 함께, 입자 주위의 맥스웰 스트레스 텐서 표면의 요구되는 변위(required displacement)가 상기 힘들의 계산을 방해한다. 광 트랩핑의 품질에 관련된 공통 성능 지수(common figure of merit)는 주어진 입자 사이즈에 대한 트랩 강도이다. 도 5의 그래프로부터, 1.96 pNm⁻¹W⁻¹의 반경방향(X-Y평면에서) 트랩강도에 대응하면서, X, Y 및 Z 축을 따라 상기 100 nm 폴리스티렌 마이크로 구에 대해 각각 4.81, 3.30, 및 8.53 pNm⁻¹W⁻¹의 트랩 강도를 평가할 수 있다.

[0030] X 및 Y 축들에서 트랩핑 강도에 대한 실험 값들을 얻고, 이들을 이론적 추정치들과 비교하기 위하여, 트랩된 200 nm 입자의 억제된 브라운 운동(suppressed Brownian motion)이 연구되었다. 상기 나노입자와 실리콘 광자 결정 공진기 표면 사이의 정지마찰(stiction)을 최소화하기 위하여 계면 활성제(surfactant)로서 Triton X-100(1%)를 사용하였다. 도 6a는, 도파관 출력에서 측정된 출력 전력이 140 μW일 때 200 nm 입자의 위치 자취(position trace)의 산포도(scatter plot)를 예시한다. 상기 산포도는 상기 실리콘 광자 결정 공진기 내 필드 분포의 상부에 오버레이(overlay)된다(스케일링을 위해). 그러한 낮은 광 전력들에서, 트랩핑이 약하고(weak), 입자가 상기 공진 광 필드의 두개의 중심 로브들(two center lobes) 사이를 hopping하는 것이 분명하다. 또한 상기 입자가 짧은 지속 시간 동안 측부 로브들(side lobes)에서 더 약한 트랩들로 hopping하는 것을 관측할 수 있다. 상기 도파관 출력에서 측정된 전력이 175 μW가 되도록 전력이 올라갈 때, 트랩핑의 세기는 증가하고 상기 입자가 단일 사이트(single site)에 안정적으로 트랩된 상태를 유지하는 것이 관측된다. 도 6c 및 도 6d는 트랩된 200 nm 입자의 변위(displacement)에 대한 히스토그램을 보여준다. 이들 각각은 가우스 분포(Gaussian distribution)를 보여준다. 이 그래프들로부터, 200 nm 입자에 대해 5.38 pNm⁻¹W⁻¹의 수치 추정치보다 약간 낮은 2.86 pNm⁻¹W⁻¹의 반경 방향 트랩핑 강도를 결정할 수 있다(아래에서 추가적인 정보를 보라). 상기 실험적으로 관측된 트랩 강도는 수치 추정치들과 잘 합리적으로 일치하므로, 입자와 광자 결정 공진기 표면 사이의 표면

상호작용들이 트랩핑 특성을 지배하지 않는다고 추론할 수 있다. 일반적으로, 더 큰 입자들은 광 트랩핑 필드의 더 큰 부분에 의해 영향을 받는 만큼, 더 높은 트랩핑 강도를 관측할 수 있다.

[0031] 제 1 실시 예에 따른 공진 광 트랩핑 장치에 대한 추정된 트랩핑 강도는 슬롯 도파관들(slot waveguides)의 그것보다 더 큰 크기의 차수(an order of magnitude)이고, 플라즈몬 트위저들(plasmonic tweezers)(200 nm 비드 (bead)에 대해 $0.013 \text{ pNm}^{-1}\text{W}^{-1}$; Grigorenko 등, Nat. Photonics, 2008, 2, 365-370을 보라), 종래 고-NA 광 트 위저들(high-NA optical tweezers)(500 nm비드에 대해 $0.16 \text{ pNm}^{-1}\text{W}^{-1}$; Neuman 등, Rev. Sci. Instrum., 2004, 75, 2787-2809를 보라), 및 프레스넬 존 플레이트 광 트위저들(Fresnel zone plate optical tweezers)(2 μm 비 드에 대해 $0.1 \text{ pNm}^{-1}\text{W}^{-1}$; Schonbrun 등, Appl. Phys. Lett., 2008, 92, 071112-3을 보라)과 같은 다른 최근의 광 트랩핑 기술들보다 더 큰 크기의 수 차수들(several orders of magnitude)이다. 트랩핑 강도의 입자 크기 의 존성 때문에 이들 서로 다른 트랩핑 기술들 사이에 명확한 비교를 하는 것이 어렵지만, 적어도 이 제 1 실시 예 에 따른 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치 내에서 트랩핑의 강도가 최신 기술보다 적어도 어떤 크기의 차수만큼 초과하는 것은 분명하다.

[0032] 트랩된 입자의 존재는 상기 실리콘 광자 결정 공진기의 공진 파장에 어떤 작은 양만큼 영향을 미친다. 이와 같 이, 트랩된 입자가 트랩으로부터 탈출할 때, 그것은 상기 공진 파장에서 작은 시프트(slight shift)를 유도한다. 이것은 상기 결합된 광자 도파관으로부터 출력 전력에 있어서 불연속 점프(discrete jump)로부터 명 백하다. 상기 결합된 광자 도파관의 출력 단에서 레이저 전력을 모니터링함으로써, 도 6b에 보여진 바와 같이, 광 트랩으로부터 입자의 방출을 추론하는 것이 가능하다. 이 효과는 더 큰 나노입자들의 경우에 더 뚜렷하다는 것 을 유의하는 것이 중요하다. 상기 나노입자의 사이즈가 감소함에 따라, 상기 공진 파장에서 유도된 시프트는 또한 감소한다.

[0033] A. 실험 상세 사항들

[0034] 앞에서 언급한 제 1 실시 예에 따른 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치들은 250 nm 디바이스 층 두께를 가지는 실리콘-온-절연체 웨이퍼들(silicon-on-insulator wafers)로부터 제조되었다. XR-1541 전자 빔 레지스트 (electron beam resist)(HSQ, 다우코닝 사)가 상기 웨이퍼 상에 스핀(spin)되고 디바이스들은 Leica VB6-HR 전 자 빔 리소그래피 시스템(electron beam lithography system)을 사용하여 패터닝(patterning)되었다. 상기 디 바이스들의 제조 절차에 관한 상세들은 일반적으로 전통적인 것이지만, 특히 나노테이퍼 클래딩(nanotaper cladding)으로서 전자 빔 기화된 산화 실리콘(e-beam evaporated silicon oxide)의 사용을 포함한다. 이들 광 트랩핑 실험들을 수행하기 위해 충분한 광 전력을 생성하기 위하여 튜닝 가능한 적외선 레이저가 에르븀 도핑된 섬유 증폭기(EDFA; erbium-doped-fiber-amplifier)를 통하여 테이퍼된 섬유 렌즈(a tapered fiber lens)에 접 속되었다. 50-500 nm 범위의 직경과 굴절률 1.59인 형광 폴리스티렌 나노입자들이 100 mM 인산염 완충 용액 (phosphate buffer solution)에 혼합되었다. 상기 칩(chip)의 기판과 마찬가지로 상기 폴리스티렌 나노입자들과 상기 마이크로 유체 채널 표면들 사이의 점착(adhesion)과 정지마찰(stiction)을 최소화하기 위하여 1% Triton X-100 표면 활성제가 첨가되었다. PDMS 마이크로 유체 채널들은 15초 동안 플라즈마 처리(plasma treatment) 후에 상기 칩들에 결합되었다. 채널들은 120 μm 폭에 5 μm 높이었다. 상기 마이크로 채널들 내에서 상기 유체 흐름을 제어하기 위하여 주사 펌프(syringe pump)가 사용되었다. Video Spot Tracker 소프트웨어 패키지를 이용 하여 입자 위치와 브라운 운동에 대한 측정들이 이루어졌다.

[0035] B. 억제된 브라운 운동 및 트랩 강도 측정

[0036] 상기 공개에 따라, 실리콘 버스 광자 도파관의 출력에서 전력이 175 μW 로 측정되었을 때 트랩된 200-nm 폴리스 티렌 나노입자의 억제된 브라운 운동을 분석함으로써 상기 제 1 실시 예에 따른 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장 치들의 반경 방향 트랩핑 강도가 추정되었다. 강도 k_x 를 가진 하모니 퍼텐셜(harmonic potential) 내의 입자에 대하여, 등분배 이론(equipartition theorem)은:

[0037] $\frac{1}{2}k_bT = \frac{1}{2}k_x[x^2]$ (1)

[0038] 이고, 여기서 k_b 는 볼츠만 상수(Boltzmann constant), T 는 절대 온도, $[x^2]$ 는 트랩된 입자의 위치 분산 (positional variance)이다. 입자의 순간 위치를 측정함으로써, 광 트랩의 강도를 결정하는 것이 가능하다. 그러나, 비디오 카메라들과 같은 검출 시스템들은 순간적인 입자 위치를 측정하지 않는다. 그 대신 그들은 디바이스의 유한 적분 시간(finite integration time) W 때문에 상기 측정들에서 바이어스(bias)를 도입한다. Wong 등은 Opt. Express, 2006 14, 12517-12531에서 비디오 이미지 운동 블러(video-image motion blur)에 의해 측정들에서 도입된 이들 시스템적 바이어스들(these systematic biases)을 설명하는 새로운 방법을 증명하기 위해 상세한 실험적 및 이론적 분석을 수행하였다. 참 및 측정된 분산 $\text{var}(X)$ 및 $\text{var}(X_{\text{meas}})$ 는:

[0039] $\text{var}(X_{\text{meas}}) = \text{var}(X)S(\alpha)$ (2)

[0040] 에 의해 관련된다. 여기에서 $S(\alpha)$ 는 운동 블러 보정 함수(motion blur correction function)이다. α 는 $Wk_x/2\pi\gamma$ 에 의해 주어지며 여기에서 γ 는 스토크의 드래그 계수(Stoke's drag coefficient)이고 W 는 51.17 ms이다. 방정식 (1)과 방정식 (2)를 결합함으로써:

[0041] $\text{var}(X_{\text{max}}) = [(k_bT)W/2\pi\gamma][S(\alpha)/\alpha]$ (3)

[0042] 를 얻을 수 있다. 방정식 (3)은 도 6c 도 6d로부터 결정된 및 $\text{var}(X_{\text{meas}})$ 와 $\text{var}(Y_{\text{meas}})$ 에 대한 값들을 이용하여 α 에 대하여 수치적으로 풀릴 수 있다. 이와 같이 X 와 Y 축들을 따라 각각 3.73×10^{-3} pN/nm, 3.50×10^{-3} pN/nm의 트랩 강도 값들을 얻을 수 있다. 또한 X 와 Y 축들에서 브라운 변동들(Brownian fluctuations)의 참 표준 편차(true standard deviation)를 각각 33.2 nm 및 34.3 nm를 결정할 수 있다.

[0043] 광자 결정 공진기에 대한 공진 출력 스펙트럼(resonant output spectrum)이 기록되었다. 비공진 파장에 대한 출력 전력 대 공진 파장에서의 출력 전력의 비는 0.44로 결정되었다. 추가적으로, HSQ/XR-1541(다우 코닝 사)를 이용하여 제조된 실리콘 결정 버스 광자 도파관들은 전형적으로 2 dB/cm 근처의 전파 손실(propagation losses)을 보여주었다. 이들을 고려하여, 실리콘 버스 광자 도파관들에서의 대응하는 입력 전력은 630.4 μ W로 추정할 수 있다. 이와 같이 상기한 제 1 실시 예에 따른 공진 광 트랩핑 장치에 대한 전력 정규화된 강도(power normalized stiffness)는 X 와 Y 축들을 따라 각각 $5.90 \text{ pNm}^{-1}\text{W}^{-1}$ 및 $5.55 \text{ pNm}^{-1}\text{W}^{-1}$ 로 결정되고, 최종 반경 방향 트랩 강도는 $2.86 \text{ pNm}^{-1}\text{W}^{-1}$ 이 된다.

[0044] 상세한 3차원 유한 요소 수치 분석을 수행함으로써, $15.85 \text{ pNm}^{-1}\text{W}^{-1}$ (X 축) 및 $8.14 \text{ pNm}^{-1}\text{W}^{-1}$ (Y 축)의 이론적 트랩 강도 값들을 얻을 수 있고, 그 결과 $5.38 \text{ pNm}^{-1}\text{W}^{-1}$ 의 순 반경방향 트랩 강도(net radial trap stiffness)를 얻는다. 이들 계산들의 결과들은 도 7a 및 도 7b에서 보여진다.

[0045] 도 7a 및 도 7b 내에서, 모든 힘들은 상기 도파관에서 상기 1-W의 입력 전력에 정규화된다(normalized). 도 7a 내에서, 200-nm 트랩된 폴리스티렌 나노입자는 상기 실리콘 광자 결정 공진기의 길이 방향(X 축)을 따라 변위됨에 따라 어떤 힘을 경험한다. 제로 X 축 값(zero X -axis value)은 상기 로브 중심(lobe center)에서 안정된 트랩 위치에 대응한다. 상기 그래프의 선형 영역에서의 기울기(slope)는 X 축을 따라 $15.85 \text{ pNm}^{-1}\text{W}^{-1}$ 의 트랩핑 강도를 나타낸다. 도 7b 내에서, 200-nm 입자에 대한 복원력(restoring force)은 상기 실리콘 광자 결정 공진기의 길이에 수직인, Y 축에서 변위된다. 제로 Y 축 값(zero Y -axis value)은 상기 로브 중심에서 안정된 트랩핑 위치

에 대응한다. 상기 그래프에서 선형 영역의 기울기는 Y 축을 따라 $8.14 \text{ pNm}^{-1} \text{ W}^{-1}$ 의 트랩핑 강도를 나타낸다.

[0046] II. 질화 실리콘 재료들로 제조된, 통합적으로 결합된 광자 도파관에 기초한 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치 (Integrally Coupled Photonic Waveguide Based Photonic Crystal Resonator Optical Trapping Apparatus Fabricated From Silicon Nitride Materials)

[0047] 전통적인 광 트위저들(conventional optical tweezers)이 10년 이상 사용되어왔지만, 집속 점(focusing spot)의 사이즈(size)가 굴절에 의해 제한되므로 그들은 직경 약 100 nm 보다 큰 유전체 입자들을 트랩하는데 일반적으로 제한된다. 여러 가지 종류의 근접 필드(near field) 광 트랩핑 디바이스들 중에서, 광자 결정 공진기들이 매우 조그만 볼륨에 전기 장들(electric fields)을 가둘 수 있으므로 훨씬 더 작은 나노입자들 및 바이오파인들(biomolecules)의 트랩핑에 특별히 진도 유망하다. 그러나, 조그만 바이오파인들을 트랩하기 위해 광자 결정 공진기들을 이용하기 위해, 필드 그레이디언트(field gradient)를 증가시키도록 공진기들의 설계를 최적화하는 것 외에, 트랩된 바이오파인들이 정상적으로 기능하고, 부력 구동된 흐름(buoyancy driven flow) 및 열적 가열로부터 기인하는 열영동(thermophoresis)이 바이오파인들의 핫 스팟들(hot spots)로의 운반에 영향을 미치지 않도록 상기 디바이스들의 근처에서 발생된 열을 최소화하는 것이 극히 중요하다.

[0048] 열적 가열을 감소시키기 위해, 지금까지 시연된, 대부분 실리콘으로 만들어진 거의 모든 근접 필드 광 트랩핑 디바이스들이 ~1550 nm의 파장에서 동작하도록 설계되었지만, 실시 예들에 따른 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치의 제 2 실시 예는 광자 결정 공진기의 동작 파장으로서 1064 nm(또는 대안적으로 약 700 내지 1200 나노미터 범위의 파장)을 이용한다. 이것은 이 파장의 광이 1550 nm 광에 비교할 때 물에 의해 상당히 더 적게 흡수되기 때문이다. 특히 바이오파인들을 트랩하기 위하여 1064 nm 광을 이용하는 또 다른 이점은 분자들이 750-1200 nm 주위 스펙트럼에서 상대적으로 더 투과성(transparent)이라는 것이다. 이것은, 트랩핑을 위해 위에서 언급된 스펙트럼 내 광이 이용될 때, 바이오파인들에 대한 광 손상(photodamage)이 최소화 된다는 것을 의미한다. 부분적으로 상기 동작 파장의 선택 때문에, 제 2 실시 예에 따른 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치를 제조하기 위해 실리콘 대신 질화 실리콘이 이용된다. 질화 실리콘은 가시 또는 적외선 근처 스펙트럼(visible and near-infrared spectrum)에서 투명하고, 근접-필드 광 트랩핑 응용들에 적합한 광 및 재료 특성들을 가진다.

[0049] 도 8a 및 도 8b는 제 2 실시 예에 따른 질화 실리콘 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치의 도해 평면 방향 다이어그램들을 보여준다. 도 1a 및 도 2와 대조적으로, 질화 실리콘 1 차원 광자 결정 공진기는 도파관과 통합적이고, 캐비티(cavity)의 어느 쪽이든 적어도 약 53개의 홀들(holes)까지 (그리고 또한 적어도 10개 홀)과 상기 캐비티의 중심에 있는 조그만 홀을 포함할 수 있다. 캐비티에 상기 조그만 홀을 추가함으로써, 광 필드 세기와 그와 같이 상기 홀의 위치에서 질화 실리콘 광자 결정 공진기 내 트랩핑 강도가 상당히 증가된다. 다른 홀들의 사이즈들은 다른 전통적인 설계 원리들에 기초하여 조정될 수 있다. 상기 질화 실리콘 광자 결정 공진기와 통합 광자 도파관들은 질화 실리콘(굴절률 $n=2.0$)으로 만들어지고, 상기 광자 결정 공진기들과 도파관들의 바닥에 클래딩 층(cladding layer)은 이산화 실리콘(silicon dioxide)(굴절률 $n=1.45$)로 만들어진다. 홀들과 상기 광자 결정 공진기들의 상부는 전형적인 광 트랩핑 실험들에서 사용되는 수용액(aqueous solution)에 노출된다. 도 8c는 제 2 실시 예에 따른 질화 실리콘 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치가 22 나노미터 폴리스티렌 폴리머 나노입자를 그 위에 트랩한 이미지를 보여준다. 마지막으로 도 8d는 유체 흐름 셀(fluid flow cell)에 통합된 질화 실리콘 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치를 보여준다. 3차원 유한 차분 시간 영역(FDTD; finite-difference time domain) 시뮬레이션들에 따르면, 제 2 실시 예에 따른 질화 실리콘 광자 결정 공진기의 공진 파장은 ~1064 nm이다. Q-팩터(Q-factor)는 ~5000이고, 모드 볼륨(mode volume)은 $\sim 4.4 (\lambda/n)^3$ 이다. 그러한 질화 실리콘 광자 결정 공진기의 Q-팩터가 지금까지 시연된 다른 고-Q 광자 결정 공진기들에 비해 높지 않지만, 실험 결과들은 2 실시 예에 따른 그러한 질화 실리콘 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치가 부분적으로 연장된 Lambda DNA 분자들뿐만 아니라 22-nm 폴리스티렌 폴리머 입자들, 양자 점들(quantum dots) 및 윌슨병 단백질들(Wilson disease proteins)을 효과적으로 트랩할 수 있다. 이들은 모두 전통적인 광 트위저들을 이용해서는 광적으로 트랩하기가 매우 어렵다. 제 2 실시 예에 따른 질화 실리콘 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치의 우수한 광 트랩핑 능력은 예상된 실험 조건들 하에서 질화 실리콘 광자 결정 공진기에서 열적 가열이 거의 없다는 관측 사실에 강하게 관련되어 있다고 믿어진다.

[0050] 도 9는 제 2 실시 예에 따른 질화 실리콘 광자 결정 공진기 상에 22-nm 형광 폴리머 입자의 트랩핑 및 방출을 예시하는 일련의 형광 현미경 관찰 이미지들을 보여준다. 각 실험에서, 커버슬립(coverslip)과 제조된 칩 사이에 파라필름 스페이서들(parafilm spacers)을 둬으로써 만들어진 흐름 챔버(flow chamber)에 흐름(a flow)을 생성하기 위해 주사 펌프(syringe pump)가 이용되었다. 상기 제조된 칩의 표면은 비특이성 결합(nonspecific binding)을 최소화하기 위하여 카세인(casein)으로 덮였다. 도 9에서 보는 바와 같이, TE 분극된 1064-nm 레이저 광이 상기 질화 실리콘 광자 결정 공진기와 통합적으로 결합되고 접촉된 질화 실리콘 광자 도파관에 결합될 때, 상기 22-nm 폴리머 입자가 질화 실리콘 광자 결정 공진기에 트랩되었다. 질화 실리콘 광자 결정 공진기에 결합된 레이저 전력은 10mW 이하였다. 여기 파장(excitation wavelength)이 상기 질화 실리콘 광자 결정 공진기의 공진 파장과 매칭(matching)하도록 상기 레이저의 파장을 미세 튜닝하기(fine-tune) 위해 레이저 다이오드의 온도가 조정되었다.

[0051] 이 특별한 제 2 실시 예에서, 전기 필드들(electric fields)이 상기 캐버티의 중심을 제외하고 상기 홀들에서 보다 두 개의 인접한 홀들 사이에서 훨씬 더 강하므로 상기 트랩된 22-nm 폴리머 입자가 레이저 방향으로 질화 실리콘 광자 결정 공진기 표면을 움직일 때 한 곳에서 다른 곳으로 점프했다. 레이저가 턴 오프(turn off)된 후, 상기 트랩된 입자는 상기 질화 실리콘 광자 결정 공진기로부터 방출되었다. 이것은 상기 폴리머 입자의 트랩핑이 비특이성 결합보다 광 힘들(optical forces)에 의한 것임을 시사한다. 코어 직경이 ~10-15 nm인 스트렙타비딘-코팅된(streptavidin-coated) CdSe/ZnS 양자 점들(QDs)과 함께 유사한 광 트랩핑 실험들이 행해졌다. 질화 실리콘의 본질적인 형광성 때문에, 양자 점들(QDs)이 그들의 형광성을 관측함으로써 질화 실리콘 광자 결정 공진기상에 트랩되었는지를 결정하는 것이 어려웠다. 그러므로, 양자 점들(QDs)의 트랩핑을 관측하기 위해, CCD 카메라 앞에 1064-nm 레이저 광을 블록킹(blocking)하는 광 필터(optical filter)가 제거되어, 광적으로 트랩핑된 양자 점들(QDs)에 의해 산란된(scattered) 레이저 광이 상기 CCD 카메라에 의해 보여질 수 있도록 하였다. 도 10a에서 보여지는 것처럼, 양자 점들(QDs)이 상기 캐버티 내 및 가까이에 트랩되고, 그 결과 질화 실리콘 광자 결정 공진기가 공진 상태에 있을 때 1064-nm 광이 상당한 산란을 하였다. 그러나, 형광성 광만이 통과할 수 있도록 상기 카메라 앞에서 1064-nm 광을 블록킹(blocking)하도록 레이저 필터가 되돌려졌을(be returned) 때, 상기 질화 실리콘 트랩된 것들이 아니라 상기 흐름 챔버에 흐르는 양자 점들(QDs)만이 관측되었다. 하나의 가능한 설명은 어떤 종류의 형광 억제 효과(some kind of fluorescence quenching effect)가 상기 트랩된 양자 점들(QDs)의 형광성이 상기 광자 결정 공진기 표면에서 사라지게 하였을 것이라는 것이다.

[0052] 직경이 단지 ~10 nm인 율슨병 단백질들이 또한 제 2 실시 예에 따른 질화 실리콘 광자 결정 공진기를 이용하여 트랩되었다. 이들 단백질들은 Cy3 및 Cy5 염색제들(dyes)에 결합될 수 있는 두 개의 사이트들(sites)을 가지고 있다. 형광 현미경에서 이용될 수 있는 필터 큐브(filter cube)는 Cy3가 아닌 Cy5를 관측하기 위한 것이므로, 상기 CCD 카메라에 의해 보여지는 각 단백질은 하나 또는 두 개의 Cy5 염색제들을 가지고 있다. 도 10b에서 보여지는 바처럼, 율슨 병 단백질들은 질화 실리콘 광자 결정 공진기 표면 근처 가까이 있을 때 트랩되었고, 상기 Cy5 염색제들은 ~10 초보다 적은 시간 뒤에 점차적으로 광표백되었다(photobleached). 도 10c에 보여진, 형광 세기(fluorescence intensity) 1-단 쇠퇴(one-stage decay)는 상기 트랩된 단백질이 단백질들의 집합체라기보다는 단일 단백질이라는 것을 시사한다. 유한 요소 분석은 이용된 실험 조건들 하에서, 상기 제 2 실시 예에 따른 질화 실리콘 광자 결정 공진기의 공진기 캐버티에서 온도 상승이 0.1K보다 작다는 것을 보여준다. 이것은 생물학적 활동들(biological activities)에 영향을 주지 않을 만큼 충분히 작다. 대조적으로, 수치 및 실험 결과들에 따라, 1550 nm 광에 의해 여기되고 ~3000의 Q 팩터를 가지는 앞서의 제 1 실시 예에 따른 실리콘 광자 결정 공진기 상의 온도 상승은 유사한 실험 조건들 하에서 60K의 차수(order)이다. 두 개의 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치 사이의 온도 상승에 있어서의 차이는, 조그만 바이오피자들을 트랩하기 위해 1550 nm에서 동작하는 실리콘 광자 결정 공진기들에 비해 1064 nm에서 동작하는 질화 실리콘 광자 결정 공진기들을 이용하는 이익들을 부각시킨다.

[0053] 제 2 실시 예에 따른 질화 실리콘 광자 결정 공진기의 트랩핑 강도를 결정하기 위해, 트랩된 22-nm 형광 폴리스티렌 폴리머 입자의 억제된 브라운 운동이 측정되었다. 도 11a 및 도 11b는 각각 공진기에 결합된 레이저 전력이 ~6 mW 일 때, X 및 Y 방향에서 상기 트랩된 입자의 변위의 히스토그램들을 나타낸다. 입자 운동의 측정들에

대한 상기 CCD 카메라의 적분 시간의 효과에 대해 보정한 후, 상기 X 및 Y 방향에서 상기 브라운 운동의 표준 편차가 각각 75.7 nm 및 94.4 nm임을 결정할 수 있다. X 및 Y 방향에서 광 트랩의 강도는 각각 $0.12 \text{ pNm}^{-1} \text{ W}^{-1}$ 및 $0.08 \text{ pNm}^{-1} \text{ W}^{-1}$ 로 결정되었다. 다시, 상기 트랩핑 강도가 입자 사이즈에 의존하는 만큼, 서로 다른 광 트랩핑 디바이스들의 광 트랩핑 능력을 비교하는 것이 어렵지만, 제 2 실시 예에 따른 광자 결정 공진기가 15-nm 양자 점들(QDs), 22-nm 폴리머 입자들, 및 10-nm 윌슨 병 단백질들을 트랩할 수 있다는 관측은 제 2 실시 예에 따른 질화 실리콘 광자 결정 공진기의 우수한 트랩핑 능력을 이미 입증한다.

[0054] 이 연구에서 입증된 바처럼, 적외선 근처 또는 가시 파장에서 동작하는 질화 실리콘 광자 결정 공진기들은 많은 열을 발생시키지 않고 높은 광 트랩핑 강도를 제공할 수 있다. 상당히 감소된 열 발생은 상기 트랩된 바이오분자들이 정상적으로 기능할 수 있고 흐름 챔버에서 바이오분자들의 운반이 열적 효과들에 의해 영향을 받지 않을 것이라는 것을 보장한다. 이 연구에서 이용된 것과 같은, 제 2 실시 예에 따른 질화 실리콘 광자 결정 공진기들은, 너무 작아서 단일-분자 연구들을 위한 다른 광 트랩핑 기법들을 이용하여 쉽게 트랩될 수 없는 작은 바이오분자들을 트랩하기 위해 이용될 수 있다.

[0055] 실시예

[0056] A. 디바이스 제조

[0057] 제 2 실시 예에 따른 질화 실리콘 광자 결정 공진기 광 트랩핑 디바이스들 및 장치들이 $3.5 \mu\text{m}$ 두께 열적 산화 층을 포함한 실리콘 웨이퍼들을 이용하여 제조되었다. 250 nm 두께의 화학량론적 질화 실리콘 층(stoichiometric silicon nitride layer)이 저압 화학적 증착(LPCVD; low-pressure chemical vapour deposition) 과정을 이용하여 상기 열적 산화 층에 증착되었다. 예를 들어, ma-N 2403 전자 빔 포토레지스트(photoresist)가 웨이퍼 상에 스피닝된(spun) 다음, JEOL 9300 전자 빔 리소그래피 시스템을 이용하여 패터닝되었다. 그 다음 질화 실리콘 층이 유도적으로 결합된 플라즈마 반응 이온 에치(ICP RIE; inductively coupled plasma reactive ion etch) 시스템, Oxford 100을 이용하여 ma-N 2403 마스크(mask)로 에칭되었다. 그 다음, 리프트-오프(lift-off) 과정을 이용하여 패터닝된 이산화 실리콘 층을 생성하였다. 이 층은 $3 \mu\text{m}$ 두께였고, 질화 실리콘 광자 결정 공진기들이 위치되는 영역을 제외하고 전체 웨이퍼를 덮기 위하여 마그네트론 스퍼터링 증착 시스템(magnetron sputtering deposition system), CVC 601을 이용하여 증착되었다.

[0058] B. 나노입자 샘플 준비

[0059] 22-nm 형광 폴리스티렌 나노입자들(Thermo Scientific)을 1X 인산염 완충된 식염수 용액(PBS; phosphate buffered saline solution)에 부유시키고(suspend), 스트렙타비딘 코팅된 양자 점들(streptavidin-coated QDs)(Life Technologies)을 50mM 붕산염 완충 용액(borate buffer solution)(pH 7.4)에 부유시켰다. 윌슨 병 단백질들은 HEPES 완충 용액(60 mM HEPES, 110 mM NaCl, 1 mM EDTA, pH 7.4)에 부유시켰다. 위에서 언급한 이들 세 완충 용액들 각각은 또한 비특이성 결합(nonspecific binding)을 감소시키기 위해 0.05%(v/v) Tween 20 표면활성제를 포함했다. 50 nM 프로토타테퀴산염-3, 4-이산소화효소(PCD; protocatechuate-3, 4-dioxygenase)와 2.5 mM 프로토타테퀴산(PCOA; protocatechuic acid)으로 구성된 산소 스캐빈징 시스템(oxygen scavenging system)이, 형광 염색제들(fluorescent dyes)의 안정화를 위해 각 광 트랩핑 실험 바로 전에 상기 완충 용액에 도입되었다.

[0060] C. 유체 챔버(fluid chamber) 준비

[0061] 유체 챔버를 준비하기 위해, 두 개의 액세스 홀들(access holes)이 레이저 시스템을 이용하여 커버슬립(cover slip) 상에 제조된 다음, 타이콘 튜빙(Tygon tubing)이 에폭시 글루(epoxy glue)를 이용하여 상기 액세스 홀들에 부착되었다. 그 다음, 시일된 유체 챔버(sealed fluid chamber)를 만들기 위해, 상기 커버슬립, 상기 제조된 칩, 및 파라필름 스페이서(Parafilm spacer)(이것은 홀들 사이 흐름 채널을 위해 컷-아웃(cut-out)을 가졌다)를 서로 샌드위치하고(sandwich) 잠시 베이킹(baking)하였다. 주사기 펌프(syringe pump)에 의해 구동되는 주사기(syringe)를 이용하여 타이콘 튜빙을 통하여 상기 유체 챔버 내에 상기 완충 용액들을 주입하였다.

상기 유체 চে임버에 입자들을 도입하기 전에, 상기 유체 চে임버를 우선, 비특이성 결합을 방지하기 위해 ~20 분 동안 1 mg/ml 카세인(casein)을 가진 PBS 용액으로 인큐베이팅(incubating)하였다.

[0062] D. 광 트랩핑 실험들

[0063] 광 트랩핑을 위한 광 소스(light source)를 제공하기 위해 1064-nm 광섬유 결합된 고출력 다이오드 레이저(1064-nm fiber-coupled high power diode laser)를 이용하였다. 레이저 광은 렌즈형 광섬유(lensed fiber)를 통해 질화 실리콘 광자 도파관에 결합되었다. 상기 레이저 다이오드의 온도는 상기 레이저 다이오드의 중심 파장을 미세 튜닝(fine-tuning)하기 위해 조정되었다. 이것은 섭씨 1도 당 0.3 nm(0.3nm per degree centigrade) 시프트(shift)하였다. Hamamatsu ORCA-ER CCD 카메라를 이용하여 이미지들을 캡처(capture)했다.

[0064] E. 시뮬레이션 및 데이터 분석

[0065] 22-nm 폴리스티렌 폴리머 나노입자들의 브라운 운동 분석이 UNC Chapel Hill에 있는 CISMM에 의해 개발된 Video Spot Tracker 소프트웨어를 이용하여 이루어지고, 3차원 FDTD 시뮬레이션이 FDTD Solutions(Lumerical Solutions, Inc.)를 이용하여 수행되었다. Video Spot Tracker 소프트웨어의 FIONA 커널(kernel)이 입자 추적을 위해 이용되었다. 윌슨 병 단백질의 형광 세기의 쇠퇴가 ImageJ 소프트웨어(US National Institutes of Health)를 이용하여 결정되었다.

[0066] 여기에서 인용된 간행물, 특허출원들, 및 특허들을 포함하는 모든 참조들은, 각각의 참조가 언급에 의해 통합되도록 개별적으로 또는 특별하게 표시되고 여기에 전체로서 제시되었다 하더라도, 허용 가능한 정도까지 및 동일한 정도까지 전체로서 참조에 의해 여기에 통합된다.

[0067] 발명을 기술하는 내용에서 "하나의", "그" 및 "상기"와 같은 용어들 및 유사한 지시어들의 사용은, 여기에서 달리 표시되지 않았거나 문맥상 명백하게 모순되지 않는다면, 단수 또는 복수를 포함하도록 해석되어야 한다. "포함하는", "구성하는", "가지는" 등의 용어들은, 달리 언급되지 않았다면, 제한을 두지 않은 용어들(즉, "포함하지만, 그에 제한되지 않는")로서 해석되어야 한다. "접속된"이라는 용어는, 끼어드는 어떤 것이 있다 할지라도, 부분적으로 또는 전체적으로 안에 포함되고, 부착되고, 또는 서로 결합되는 것으로 해석되어야 한다.

[0068] 여기에서 값들의 범위들에 대한 설명은 단지, 여기에서 달리 표시되지 않았다면, 그 범위에 떨어지는 각 별개의 값을 개별적으로 언급하는 속기 방법으로서 기능하도록 의도된 것이고, 각 별개의 값은, 여기에서 개별적으로 인용되었다 할지라도, 이 명세서에 통합된다.

[0069] 여기에 기술된 모든 방법들은, 여기에서 달리 표시되지 않았거나 문맥상 명백하게 모순되지 않는다면, 어떤 적당한 순서로 수행될 수 있다. 여기에서 제공된 어떤 또는 모든 예들, 또는 예시적인 언어(예, "~와 같은")의 사용은 단지 본 발명의 실시 예들을 더 잘 예시하기 위해 의도된 것이고, 달리 청구되지 않는다면, 본 발명의 범위에 제한을 두지 않는다.

[0070] 이 명세서의 어떤 언어도 어떤 청구되지 않은 요소를 이 발명의 실행에 필수적인 것으로서 표시하는 것으로 해석되어서는 안 된다.

[0071] 이 기술 분야에 숙련된 사람이라면 본 발명의 정신 및 범위를 벗어나지 않고 상기 실시 예들에 다양한 변경들이나 변형들이 이루어질 수 있음이 명백할 것이다. 본 발명을 특정한 형태나 개시된 형태들로 제한하는 의도는 없고, 그러나 반대로, 그 의도는 첨부된 청구범위에 규정된 바와 같은, 본 발명의 정신과 범위 내에 떨어지는 모든 변경들, 대안적 구성들, 및 균등물들을 커버(cover)하는 것이다. 이와 같이, 본 발명은 첨부된 청구항들의

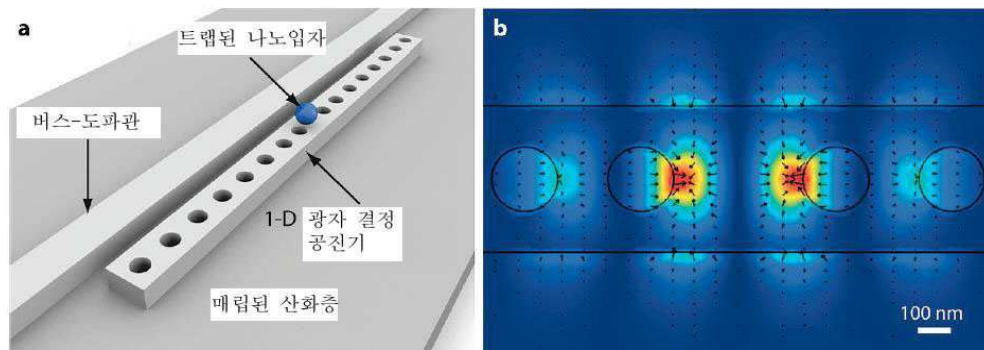
범위 내에 있는 본 발명의 변경들 및 변형들 그리고 그들의 균등물들을 커버하도록 의도되었다.

[0072]

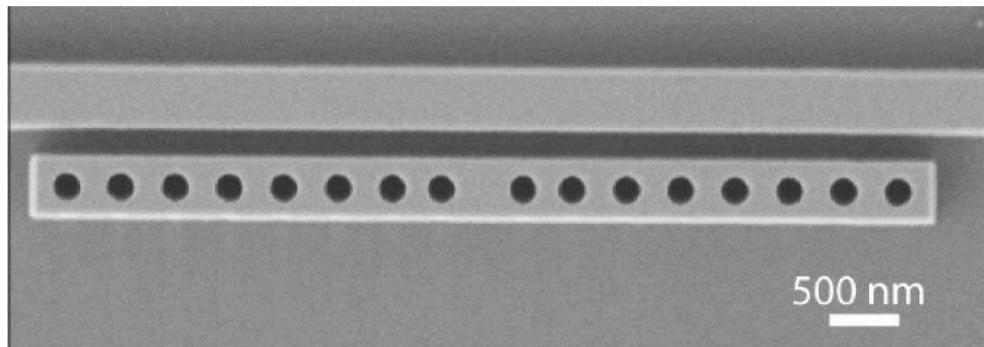
그러므로, 실시 예들은 본 발명을 제한하는 것이라기 보다 본 발명을 예시하는 것이다. 더욱이 수반되는 청구항들에 따라, 실시 예들에 따른 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치 및 상기 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치를 이용한 광 트랩핑 방법을 제공하면서, 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치 및 상기 광자 결정 공진기 광 트랩핑 장치를 이용한 광 트랩핑 방법의 방법들, 재료들, 구조들 및 치수들에 대한 수정들 및 변경들이 이루어질 수 있다.

도면

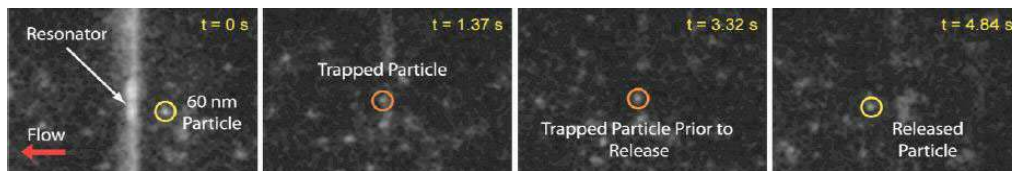
도면1



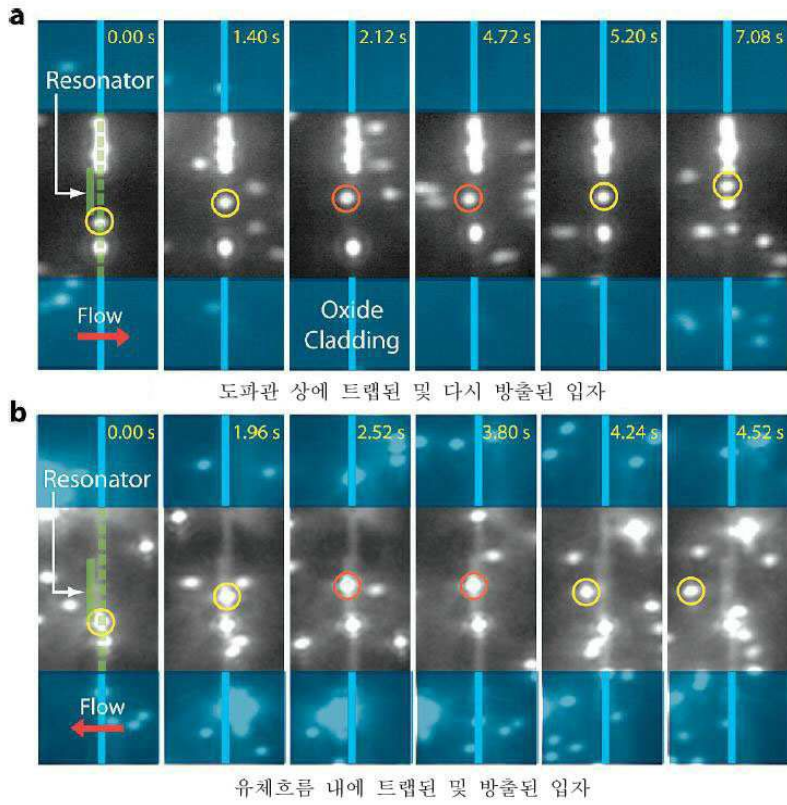
도면2



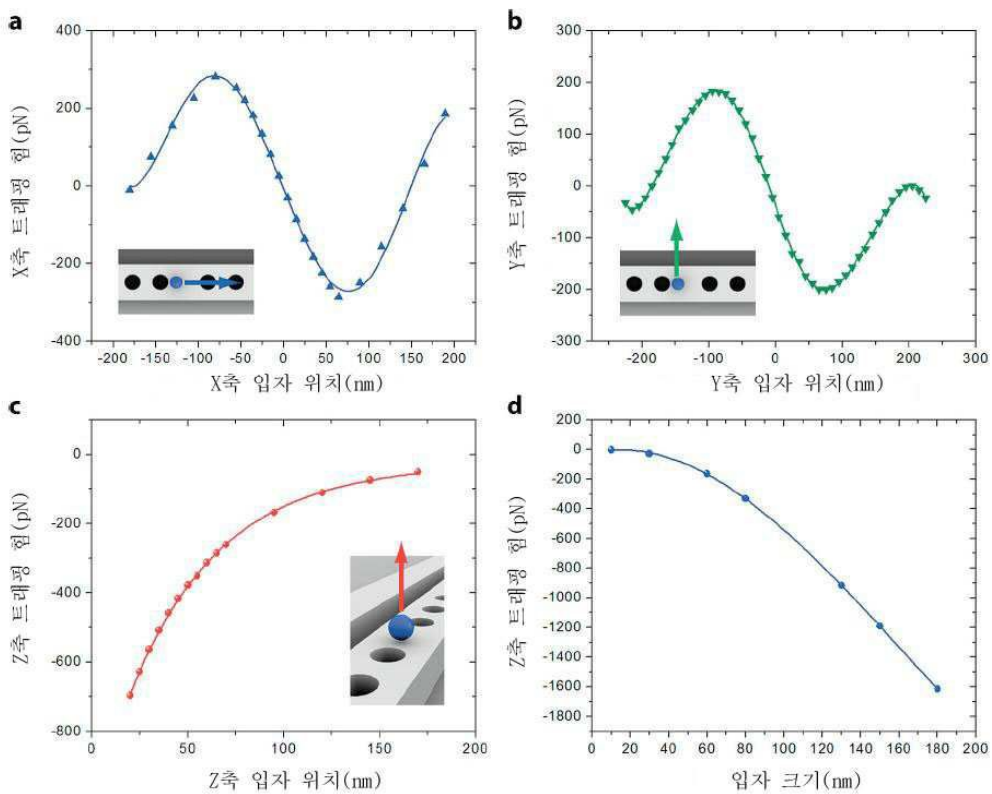
도면3



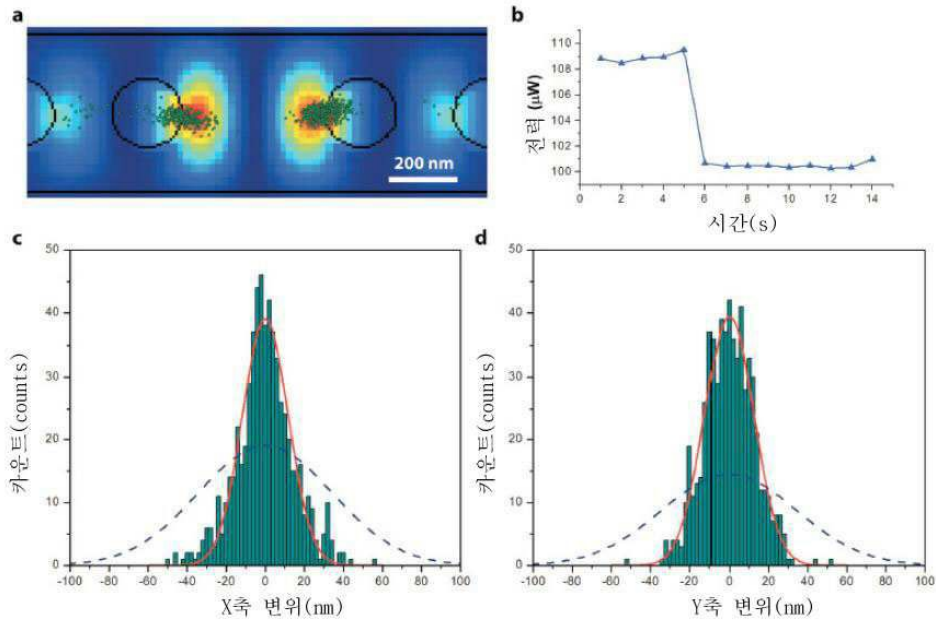
도면4



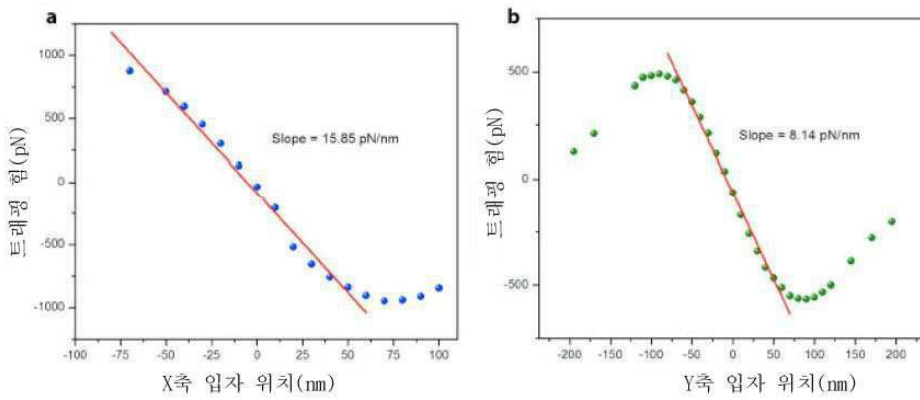
도면5



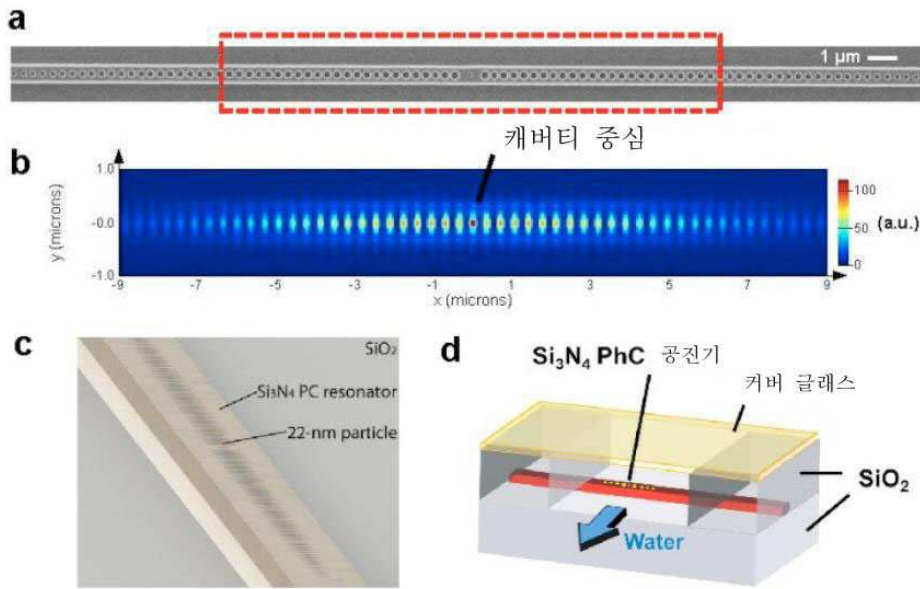
도면6



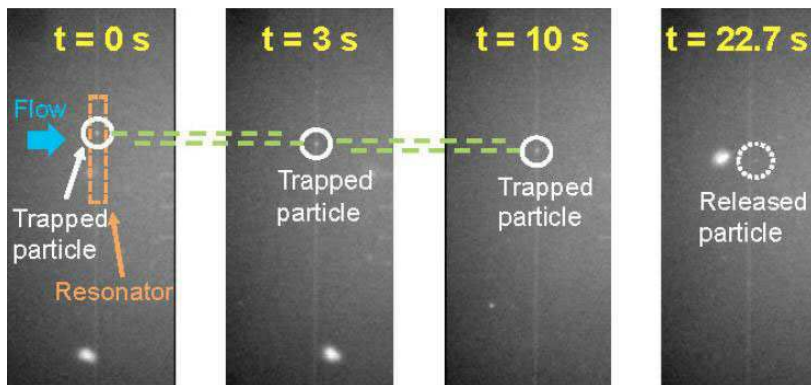
도면7



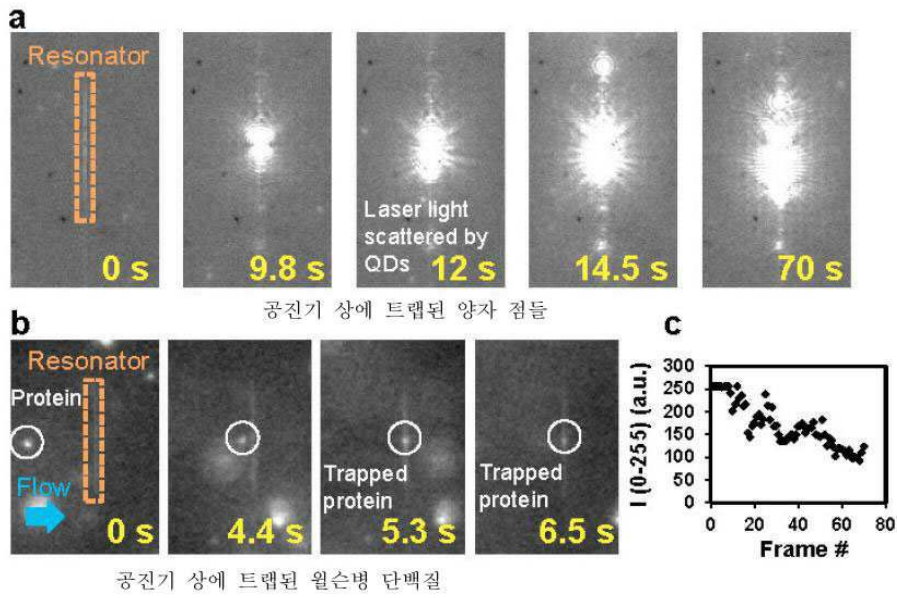
도면8



도면9



도면10



도면11

