



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2025-0022045
(43) 공개일자 2025년02월14일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01S 1/06 (2006.01) G04F 5/14 (2006.01)
H03L 7/26 (2006.01)
- (52) CPC특허분류
H01S 1/06 (2019.01)
G04F 5/14 (2013.01)
- (21) 출원번호 10-2024-7041154
- (22) 출원일자(국제) 2023년04월28일
심사청구일자 없음
- (85) 번역문제출일자 2024년12월11일
- (86) 국제출원번호 PCT/JP2023/016938
- (87) 국제공개번호 WO 2023/243246
국제공개일자 2023년12월21일
- (30) 우선권주장
JP-P-2022-096079 2022년06월14일 일본(JP)

- (71) 출원인
고쿠리쓰 겐큐 가이하쓰 호징 리가가쿠 겐큐소
일본국 사이타마현 와코시 히로사와 2-1
지을 리미티드
일본 도쿄도 아키히마 무사시노 3쵸메 1-2
- (72) 발명자
가토리 히데토시
일본국 사이타마현 와코시 히로사와 2-1, 고쿠리
쓰 겐큐 가이하쓰 호징 리가가쿠 겐큐소내
다카모토 마사오
일본국 사이타마현 와코시 히로사와 2-1, 고쿠리
쓰 겐큐 가이하쓰 호징 리가가쿠 겐큐소내
츠지 시게노리
일본 1968558 도쿄도 아키히마시 무사시노 3쵸메
1-2, 니혼덴시 가부시킴이샤내
- (74) 대리인
김진환, 박지하, 김민철

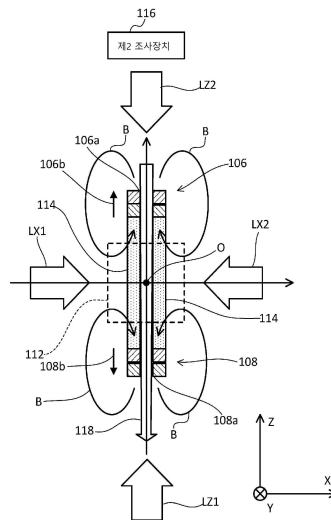
전체 청구항 수 : 총 14 항

(54) 발명의 명칭 자기 광학 트랩 장치, 물리 패키지, 광격자 시계용 물리 패키지, 원자 시계용 물리 패키지, 원자 간섭계용 물리 패키지, 양자 정보 처리 디바이스용 물리 패키지, 및 물리 패키지 시스템

(57) 요약

본 발명에 따르면 자석(106),(108)에 의해 형성되는 4중극 자기장과, 3 세트의 레이저광쌍에 의해 원자가 포착되며, 자석(106),(108)에 의해 레이저광쌍(LZ)의 일부가 마스킹됨으로써, 3 세트의 레이저광쌍이 교차하는 교차 영역(112) 내에, 비원자 포착 공간인 영역(114)이 형성되며, 교차 영역(112) 내에 레이저광(118)이 조사됨으로써, 비원자 포착 공간 내의 원자가 교차 영역(112)의 외측으로 이동한다.

대표도 - 도3



(52) CPC특허분류
H03L 7/26 (2013.01)

명세서

청구범위

청구항 1

제1 광군과 자기장에 의해 원자를 포착하는 원자 포착 공간을 형성하는 제1 형성 수단;

상기 제1 광군이 교차하는 교차 영역 내에 비원자 포착 공간을 형성하는 제2 형성 수단; 및

상기 교차 영역 내에 제2 광을 조사함으로써, 상기 비원자 포착 공간 내의 원자를 상기 교차 영역 내로부터 출사시키는 광조사 수단;

을 포함하는, 자기 광학 트랩 장치.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 제1 형성 수단과 상기 제2 형성 수단은 자기장을 발생시키는 한 쌍의 자석을 포함하고,

상기 한 쌍의 자석의 각각에는 광을 통과시키는 구멍이 형성되어 있으며,

상기 광조사 수단은 상기 구멍을 통하여 상기 교차 영역에 상기 제2 광을 조사하는, 자기 광학 트랩 장치.

청구항 3

제 2 항에 있어서,

상기 한 쌍의 자석은 상기 제1 광군 중의 일부가 진행하는 광로 상에 설치되고, 상기 제1 광군 중의 일부를 부분적으로 마스킹하고,

상기 제1 광군 중에서 상기 한 쌍의 자석에 의해 마스킹되어 있지 않은 광군과, 상기 한 쌍의 자석으로부터 발생한 자기장에 의해, 상기 한 쌍의 자석 사이에 상기 원자 포착 공간이 형성되고,

상기 한 쌍의 자석에 의해 광이 마스킹된 공간에 상기 비원자 포착 공간이 형성되는, 자기 광학 트랩 장치.

청구항 4

제 3 항에 있어서,

상기 원자 포착 공간을 형성하기 위한 보조 자석을 추가로 포함하는, 자기 광학 트랩 장치.

청구항 5

제 1 항에 있어서,

상기 제2 형성 수단은 광을 통과시키는 구멍이 형성된 한 쌍의 마스크이며,

상기 한 쌍의 마스크는, 상기 제1 광군 중의 일부가 진행하는 광로 상에 설치되어, 상기 제1 광군 중의 일부를 부분적으로 마스킹하고,

상기 광조사 수단은 상기 구멍을 통하여 상기 교차 영역에 상기 제2 광을 조사하는, 자기 광학 트랩 장치.

청구항 6

제 5 항에 있어서,

상기 한 쌍의 마스크는 상자성 물질인, 자기 광학 트랩 장치.

청구항 7

제 1 항에 있어서,

상기 제2 광은 푸시 레이저광인, 자기 광학 트랩 장치.

청구항 8

제 1 항에 있어서,

상기 제1 광은 파장이 461 nm인 레이저광, 또는 파장이 689 nm인 레이저광인, 자기 광학 트랩 장치.

청구항 9

제 1 항 내지 제 8 항 중 어느 한 항에 기재된 자기 광학 트랩 장치를 포함하는, 물리 패키지.

청구항 10

제 9 항에 기재된 물리 패키지를 포함하는, 광격자 시계용 물리 패키지.

청구항 11

제 9 항에 기재된 물리 패키지를 포함하는, 원자 시계용 물리 패키지.

청구항 12

제 9 항에 기재된 물리 패키지를 포함하는, 원자 간섭계용 물리 패키지.

청구항 13

제 9 항에 기재된 물리 패키지를 포함하는, 원자 또는 이온화된 원자에 대한 양자 정보 처리 디바이스용 물리 패키지.

청구항 14

제 9 항에 기재된 물리 패키지와,

상기 물리 패키지의 동작을 제어하는 제어 장치

를 포함하는, 물리 패키지 시스템.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 자기 광학 트랩 장치, 물리 패키지, 광격자 시계용 물리 패키지, 원자 시계용 물리 패키지, 원자 간섭계용 물리 패키지, 양자 정보 처리 디바이스용 물리 패키지, 및 물리 패키지 시스템에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 광격자 시계는 2001년에, 본 출원의 발명자 중 한 사람인 가토리 히데토시에 의해 제안된 원자 시계이다. 광격자 시계에서는 레이저광으로 형성한 광격자 내에 원자 집단을 가두고 가시광 영역의 공진 주파수를 계측하므로, 현행의 세슘 시계의 정밀도를 훨씬 능가하는 18자리 정밀도의 계측이 가능하다. 광격자 시계는 발명자들의 그룹에 의해 예의 연구 개발이 이루어지고 있는 한편, 일본 국내외의 여러 그룹에 의해서도 연구 개발이 이루어져 차세대 원자 시계로서 발전해 오고 있다.

[0003] 최근의 광격자 시계의 기술에 대해서는 예를 들면, 하기 특허문헌 1~특허문헌 3을 들 수 있다. 특허문헌 1에는 중공의 통로를 갖는 광도파로의 내부에 1차원의 이동 광격자를 형성하는 것이 기재되어 있다. 특허문헌 2에는 실험적 마법 주파수를 설정하는 형태에 대해서 기재되어 있다. 실제로 스트론튬, 이터븀, 수은, 카드뮴 및 마그네슘 등에서 마법 파장이 이론적으로 또한 실험적으로 결정되어 있었다. 또한, 특허문헌 3에는 주위의 벽으로부터 방사되는 흑체 복사로부터의 영향을 저감하는 복사 실드에 대해서 기재되어 있다.

[0004] 광격자 시계에서는 고정밀도로 시간 계측을 실시하므로, 중력에 의한 일반 상대성론적인 효과에 기초하는 지구 상의 1 cm의 고도차를, 시간의 진행 방향의 오차로서 검출할 수 있다. 그래서, 광격자 시계를 소형화, 가반화

하여 연구실 밖의 필드에서 이용할 수 있게 되면 지하 자원 탐색, 지하 공동, 마그마 덩어리의 검출 등, 새로운 측지(測地) 기술에의 응용 가능성이 확대된다. 광격자 시계를 양산하여 각지에 배치하고, 중력 포텐셜의 시간 변동을 연속 감시함으로써, 지각 변동의 검출, 중력장의 공간 매핑 등의 응용도 가능해진다. 이와 같이, 광격자 시계는 고정밀도의 시간 계측의 틀을 넘어, 새로운 기반 기술로서 사회에 공헌하는 것이 기대되고 있다.

- [0005] 일반적인 광격자 시계의 물리 패키지는 원자 오븐, 제만 감속기, 및 자기 광학 트랩 장치(MOT)를 포함한다. 원자 오븐과 제만 감속기에 의해 냉각 원자빔이 생성되고, 생성된 냉각 원자빔은 자기 광학 트랩 장치에 출력된다.
- [0006] 일반적으로 제만 감속기는 보어와, 당해 보어의 중심축을 따른 자기장을 발생시키는 자기장 발생기를 포함한다. 제만 감속기는 제만 감속법을 이용하여 원자 오븐으로부터 출사된 빠른 초속을 갖는 원자빔의 속도를, 자기 광학 트랩 장치에 의해 포착할 수 있는 속도까지 감속시킨다. 보어 내에는 보어의 개구부로부터 레이저광이 조사된다. 당해 레이저광은 원자빔의 진행 방향과는 반대 방향으로 진행되는 레이저광이며, 원자 천이 공명 주파수로부터 도플러 시프트항을 보정하여 얻어진 주파수를 갖는 레이저광이다. 당해 레이저광의 강한 복사력에 의해 원자빔이 감속된다. 또한, 자기장 발생기에 의해 보어를 중심으로 공간적으로 구배를 갖는 자기장을 형성함으로써, 감속에 따른 도플러 시프트의 변화를 제만 시프트로 보완하고, 원자에 대하여 감속용의 레이저광이 항상 공명하는 상황을 만들어 낼 수 있다.
- [0007] 제만 감속기의 후단에 위치하는 자기 광학 트랩 장치는 복수의 레이저광과, 원자가 포착되는 위치를 중심으로 형성된 4중극 자기장에 의해 원자를 포착한다.
- [0008] 레이저광의 주파수는 원자의 공진 주파수로부터 음(負)으로 이조(離調)된 값으로 설정된다. 레이저광의 광자가 원자에 흡수될 때, 광자의 운동량이 원자에 부여되고 원자에 대하여 복사압으로서 작용한다. 원자가 유한의 속도로 운동하고 있을 때, 그 운동에 대항하는 레이저광의 주파수는 원자의 공명 주파수에 근접하도록 도플러 시프트한다. 한편, 그 운동의 방향과 평행한 레이저광의 주파수는 원자의 공명 주파수로부터 멀어지도록 도플러 시프트한다. 따라서, 원자는 운동에 대항하는 레이저광으로부터의 복사압을 보다 강하게 받고, 그 결과 원자는 감속된다.
- [0009] 또한, 4중극 자기장에 의해 위치 의존성을 갖는 복사압을 발생시킬 수 있다. 구체적으로는 그 위치 의존성을 갖는 복사압은 원자의 공명 주파수가 포착 공간의 중심으로부터 멀어짐에 따라 크게 제만 시프트하는 복사압이다. 또한, 레이저광의 편광을 선택함으로써, 복사압이 가해지는 방향을 중심으로 향하게 할 수 있다.
- [0010] 이상과 같이, 제만 감속기와 자기 광학 트랩 장치를 조합함으로써, 고속의 원자빔을 감속시켜, 포착 공간에서 원자를 포착할 수 있다.
- [0011] 예를 들면, 스트론튬 원자를 원자원으로서 사용하는 경우, 파장이 461 nm($^1S_0-^1P_1$ 준위 간의 에너지에 상당하는 파장)인 레이저광이 감속용의 레이저광으로서 사용된다.
- [0012] 그런데, 포착된 냉각 원자를, 후단의 장치를 향하여 공급하기 위한 기술이 알려져 있다.
- [0013] 또 다른 기술로서, 무빙 몰라세스(molasses)를 이용하는 기술이 알려져 있다(특허문헌 4 참조). 자기 광학 트랩을 실현하기 위한 레이저광의 쌍 중, 냉각 원자를 이동시키고자 하는 방향을 따른 레이저광의 주파수를 높이고, 그 반대 방향을 따른 레이저광의 주파수를 낮춤으로써, 냉각시킨 그대로의 상태에서 원자를, 포착 위치로부터 이동시킬 수 있다.
- [0014] 다른 기술로서, 구멍이 형성된 미러를 이용하는 기술이 알려져 있다(비특허문헌 1 참조). 구체적으로는 자기 광학 트랩을 실현하기 위한 레이저광의 쌍 중, 냉각 원자를 이동시키고자 하는 방향을 따른 레이저광을, 그와 쌍을 이루는 레이저광으로부터의 반사광으로부터 생성한다. 그 반사광을 생성하기 위한 미러의 중앙에 구멍이 형성되어 있고, 또한 그 미러는 복수 세트의 레이저광쌍이 교차하는 영역에 접하는 위치에 근접하여 설치된다. 이 구성에 의하면, 그 구멍에 의해 레이저광이 반사되지 않는 기둥 형상의 영역이 형성된다. 그 영역에 진입한 냉각 원자에는, 구멍으로부터 방출되는 방향으로 복사압이 가해지고, 그 결과, 냉각 원자는 확률적으로 미러의 구멍으로부터 인출된다. 중심축에 구멍이 형성된 원추 미러나 피라미드 미러 등이 사용되는 경우도 동일하다.
- [0015] 다른 기술로서, 서로 직교하는 3 세트의 레이저광쌍 중의 2 세트의 레이저광쌍의 광로 상에, 레이저광을 차단하는 부재를 설치하는 기술이 알려져 있다. 이 기술에서는, 3 세트의 레이저광쌍이 교차하는 영역에서 등방적인 복사압 외에, 당해 영역으로부터 멀어지는 방향을 따라 이방적인 복사압이 발생한다. 그 이방적인 복사압에 의

해 확률적으로 냉각 원자가 인출된다.

- [0016] 다른 기술로서, 트랩법을 자기 광학 트랩법으로부터 광 트랩법으로 전환하고, 냉각 원자를 구속하는 광 포텐셜을 소인(掃引)함으로써, 냉각 원자를 이동시키는 기술이 알려져 있다(특허문헌 3).
- [0017] 또 다른 기술로서, 트랩법을 자기 광학 트랩법으로부터 자기 트랩법으로 전환하고, 냉각 원자를 구속하는 자기 포텐셜을 소인함으로써, 냉각 원자를 이동시키는 기술이 알려져 있다(비특허문헌 2).
- [0018] 또한, 자기 광학 트랩 중의 원자를 비트랩 상태로 광 펄핑하여 중력에 의해 냉각 원자를 인출하는 방법이 알려져 있다(비특허문헌 3).
- [0019] 자기 광학 트랩에 필요한 4중극 자기장을 생성하는 방법으로서, 예를 들면, 반헬름홀츠 코일을 사용하는 방법이나, 자화가 서로 반평행한 영구 자석쌍을 이용하는 방법 등이 알려져 있다. 특허문헌 5에는 3 세트의 레이저광 쌍 중의 한 쌍의 레이저광을 관통하는 링 자석이, 여기 코일과 함께 사용되는 것이 기재되어 있다.

선행기술문헌

특허문헌

- [0020] (특허문헌 0001) 특허문헌 1: 일본 특허 제6206973호 공보
- (특허문헌 0002) 특허문헌 2: 일본 특허 제6635608호 공보
- (특허문헌 0003) 특허문헌 3: 일본 특허 제7189588호 공보
- (특허문헌 0004) 특허문헌 4: 미국 특허 제5274232호 명세서
- (특허문헌 0005) 특허문헌 5: 미국 특허 제10371763호 명세서

비특허문헌

- [0021] (비특허문헌 0001) 비특허문헌 1: Phys.Rev.Lett 77(1996)3331 Z.T.Liu et al.
- (비특허문헌 0002) 비특허문헌 2: Phys.Rev. A 63(2001)031401 M.Greiner et. al.
- (비특허문헌 0003) 비특허문헌 3: Phys.Rev. A 46(1992)R17 F. Shimizu et. al.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0022] 그런데, 원자 시계나 원자 간섭계 등의 장치에 있어서는, 냉각된 원자 기체가 연속적으로 공급되어, 측측이 연속적으로 실행되는 것이 요망된다.
- [0023] 본 발명의 목적은 원자를 포착하여 연속적으로 후단의 장치에 공급하는 데에 있다.

과제의 해결 수단

- [0024] 본 발명의 하나의 형태는, 제1 광군(光群)과 자기장에 의해 원자를 포착하는 원자 포착 공간을 형성하는 제1 형성 수단과, 상기 제1 광군이 교차하는 교차 영역 내에 비원자 포착 공간을 형성하는 제2 형성 수단과, 상기 교차 영역 내에 제2 광을 조사함으로써, 상기 비원자 포착 공간 내의 원자를 상기 교차 영역 내로부터 출사시키는 광조사 수단을 포함하는 것을 특징으로 하는 자기 광학 트랩 장치이다.
- [0025] 상기 제1 형성 수단과 상기 제2 형성 수단은 자기장을 발생시키는 한 쌍의 자석을 포함하고, 상기 한 쌍의 자석의 각각에는 광을 통과시키는 구멍이 형성되어 있으며, 상기 광조사 수단은, 상기 구멍을 통하여 상기 교차 영역에 상기 제2 광을 조사해도 된다.
- [0026] 상기 한 쌍의 자석은 상기 제1 광군 중의 일부가 진행하는 광로 상에 설치되고, 상기 제1 광군 중의 일부를 부분적으로 마스킹하고, 상기 제1 광군 중에서 상기 한 쌍의 자석에 의해 마스킹되어 있지 않은 광군;과, 상기 한

쌍의 자석으로부터 발생한 자기장;에 의해, 상기 한 쌍의 자석 사이에 상기 원자 포착 공간이 형성되고, 상기 한 쌍의 자석에 의해 광이 마스크된 공간에 상기 비원자 포착 공간이 형성되어도 된다.

- [0027] 자기 광학 트랩 장치는 상기 원자 포착 공간을 형성하기 위한 보조 자석을 추가로 포함해도 된다.
- [0028] 상기 제2 형성 수단은 광을 통과시키는 구멍이 형성된 한 쌍의 마스크이며, 상기 한 쌍의 마스크는 상기 제1 광군 중의 일부가 진행하는 광로 상에 설치되어, 상기 제1 광군 중의 일부를 부분적으로 마스크하고, 상기 광조사 수단은 상기 구멍을 통하여 상기 교차 영역에 상기 제2 광을 조사해도 된다.
- [0029] 상기 한 쌍의 마스크는 상(常)자성 물질이어도 된다.
- [0030] 상기 제2 광은 푸시 레이저광이어도 된다.
- [0031] 상기 제1 광군은 파장이 461 nm인 레이저광, 또는 파장이 689 nm인 레이저광이어도 된다.
- [0032] 본 발명의 하나의 형태는 상기의 자기 광학 트랩 장치를 포함하는 것을 특징으로 하는 물리 패키지이다.
- [0033] 본 발명의 하나의 형태는 상기의 물리 패키지를 포함하는 것을 특징으로 하는 광격자 시계용 물리 패키지이다.
- [0034] 본 발명의 하나의 형태는 상기의 물리 패키지를 포함하는 것을 특징으로 하는 원자 시계용 물리 패키지이다.
- [0035] 본 발명의 하나의 형태는 상기의 물리 패키지를 포함하는 것을 특징으로 하는 원자 간섭계용 물리 패키지이다.
- [0036] 본 발명의 하나의 형태는 상기의 물리 패키지를 포함하는 것을 특징으로 하는 원자 또는 이온화된 원자에 대한 양자 정보 처리 디바이스용 물리 패키지이다.
- [0037] 본 발명의 하나의 형태는 상기의 물리 패키지와, 상기 물리 패키지의 동작을 제어하는 제어 장치를 포함하는 물리 패키지 시스템이다.

발명의 효과

- [0038] 본 발명에 의하면, 원자를 포착하여 연속적으로 후단의 장치에 공급할 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0039] 도 1은 실시 형태에 관한 광격자 시계의 전체 구성을 도시하는 블록도이다.
- 도 2는 제1 실시 형태에 관한 자기 광학 트랩 장치의 개략 구성을 도시하는 단면도이다.
- 도 3은 제1 실시 형태에 관한 자기 광학 트랩 장치의 개략 구성을 도시하는 단면도이다.
- 도 4는 한 쌍의 자석을 도시하는 사시도이다.
- 도 5는 제1 실시 형태에 관한 자기 광학 트랩 장치에 의해 형성되는 자기장 분포의 계산값을 도시하는 도면이다.
- 도 6은 제1 실시 형태에 관한 자기 광학 트랩 장치에 의해 형성되는 자기장 분포의 계산값을 도시하는 도면이다.
- 도 7은 제1 실시 형태에 관한 자기 광학 트랩 장치에 의해 형성되는 자기장 분포의 계산값을 도시하는 도면이다.
- 도 8은 제1 실시 형태에 관한 자기 광학 트랩 장치에 의해 형성되는 자기장 분포의 계산값을 도시하는 도면이다.
- 도 9는 한쌍의 자석의 변형예를 도시하는 사시도이다.
- 도 10은 한쌍의 자석의 변형예를 도시하는 사시도이다.
- 도 11은 물리 패키지의 개략을 도시하는 도면이다.
- 도 12는 제2 실시 형태에 관한 자기 광학 트랩 장치의 개략 구성을 도시하는 단면도이다.
- 도 13은 제2 실시 형태에 관한 자기 광학 트랩 장치에 의해 형성되는 자기장 분포의 계산값을 도시하는 도면이다.

도 14는 제2 실시 형태에 관한 자기 광학 트랩 장치에 의해 형성되는 자기장 분포의 계산값을 도시하는 도면이다.

도 15는 5 개의 레이저광을 도시하는 도면이다.

도 16은 제3 실시 형태에 관한 자기 광학 트랩 장치의 개략 구성을 도시하는 단면도이다.

도 17은 한 쌍의 자석의 실장 방법을 설명하기 위한 단면도이다.

도 18은 한 쌍의 자석의 실장 방법을 설명하기 위한 단면도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0040] <광격자 시계의 구성>
- [0041] 도 1을 참조하여, 실시 형태에 관한 자기 광학 트랩 장치가 사용되는 광격자 시계(10)의 개략 구성에 대해서 설명한다. 도 1은 광격자 시계(10)의 전체 구성을 도시하는 블록도이다. 여기에서는 실시 형태에 관한 자기 광학 트랩 장치가 사용되는 장치의 일례로서 광격자 시계(10)를 예로 들어 설명하지만, 물론 실시 형태에 관한 자기 광학 트랩 장치는 광격자 시계(10) 이외의 장치에 사용되어도 된다.
- [0042] 광격자 시계(10)는 예를 들면, 물리 패키지(12), 광학계 장치(14), 제어 장치(16) 및 PC(Personal Computer)(18)를 포함한다.
- [0043] 물리 패키지(12)는 원자 집단을 포착하고 광격자에 가두어 시계 천이를 일으키는 장치이다. 광학계 장치(14)는 원자 포착용 레이저광원, 시계 천이 여기 레이저 광원, 레이저 주파수 제어 장치 등의 광학적 기기를 구비한 장치이다. 광학계 장치(14)는 레이저광을 물리 패키지(12)에 보내는 외에, 물리 패키지(12)에 있어서 원자 집단이 방출한 형광 신호를 수광하여 전기 신호로 변환하고, 원자의 공명 주파수에 맞도록 레이저 광원에 피드백하는 등의 처리를 실시한다. 제어 장치(16)는 물리 패키지(12) 및 광학계 장치(14)를 제어하는 장치이다. 제어 장치(16)는 예를 들면, 물리 패키지(12)의 동작 제어, 광학계 장치(14)의 동작 제어, 및 계측에 의해 얻어진 시계 천이의 주파수 해석 등의 해석 처리를 실시한다. 물리 패키지(12), 광학계 장치(14) 및 제어 장치(16)가 상호 협력함으로써 광격자 시계(10)의 기능이 실현된다.
- [0044] PC(18)는 프로세서와 메모리를 포함하는 범용적인 컴퓨터이다. 프로세서와 메모리를 포함하는 하드웨어에 의해 소프트웨어가 실행됨으로써, PC(18)의 기능이 실현된다. PC(18)에는 광격자 시계(10)를 제어하는 어플리케이션 프로그램이 인스톨되어 있다. PC(18)는 제어 장치(16)에 접속되어 있고, 제어 장치(16)뿐만 아니라 물리 패키지(12)와 광학계 장치(14)를 포함하는 광격자 시계(10)의 전체를 제어해도 된다. 또한, PC(18)는 광격자 시계(10)의 UI(User Interface)를 제공한다. 사용자는 PC(18)를 통하여 광격자 시계(10)의 기동, 시간 계측 및 결과 확인 등을 수행할 수 있다.
- [0045] 또한, 물리 패키지(12)와 물리 패키지(12)의 제어에 필요로 되는 구성을 포함하는 시스템을, 「물리 패키지 시스템」이라고 부르는 경우가 있다. 제어에 필요로 되는 구성은 제어 장치(16) 또는 PC(18)에 포함되어도 되고, 물리 패키지(12)에 포함되어도 된다. 또한, 제어 장치(16)의 기능의 일부 또는 전부가 물리 패키지(12)에 포함되어도 된다.
- [0046] 이하, 실시 형태에 관한 자기 광학 트랩 장치에 대해서 상세하게 설명한다.
- [0047] <제1 실시 형태에 관한 자기 광학 트랩 장치>
- [0048] 도 2 내지 도 4를 참조하여, 제1 실시 형태에 관한 자기 광학 트랩 장치(100)에 대해서 설명한다. 도 2 및 도 3은 제1 실시 형태에 관한 자기 광학 트랩 장치(100)의 개략 구성을 도시하는 단면도이다. 도 4는 한 쌍의 자석을 도시하는 사시도이다.
- [0049] 여기에서, 서로 직교하는 X축, Y축 및 Z축으로 이루어지는 좌표계를 정의한다. X축, Y축 및 Z축이 서로 교차하는 점이, 원자 포착 공간(102)의 중심(O)으로서 정의되어 있다. 중심(O)는 자기 광학 트랩용의 4중극 자기장(B)의 대칭점과 일치한다.
- [0050] 자기 광학 트랩 장치(100)는 진공 챔버와, 레이저광을 원자의 원자 포착 공간(102)에 조사하는 제1 조사 장치(104)와, 4중극 자기장(B)를 생성하는 자기장 발생 장치의 일례인 한 쌍의 자석(한 쌍의 자석은 자석(106)과 자석(108)으로 구성됨)을 포함한다.

- [0051] 제1 조사 장치(104)는 레이저광을 출사하는 1 또는 복수의 광원과, 1 또는 복수의 광원으로부터 출사된 레이저광을 원자 포착 공간(102)에 조사하기 위한 1 또는 복수의 광학 소자(예를 들어, 미러나 빔 스플리터 등)를 포함한다. 제1 조사 장치(104)에 의해 서로 직교하는 3 세트의 레이저광쌍이 조사된다. 당해 3 세트의 레이저광쌍은 대상의 원자에 대하여 음으로 이조된, 합계 6 개의 공명(共鳴) 레이저광으로 이루어진다.
- [0052] 당해 3 세트의 레이저광쌍은, 구체적으로는 X축을 따라 조사되는 레이저광쌍(LX), Y축을 따라 조사되는 레이저광쌍(LY) 및 Z축을 따라 조사되는 레이저광쌍(LZ)으로 이루어진다.
- [0053] 레이저광쌍(LX)은, X축 상을 양(正)의 방향으로 진행하는 레이저광(LX1)과, X축상을 음의 방향으로 진행하는 레이저광(LX2)(즉, 레이저광(LX1)의 진행 방향과는 반대 방향으로 진행하는 레이저광)으로 이루어진다.
- [0054] 레이저광쌍(LY)은, 도 2 및 도 3에 도시되어 있지 않지만, Y축 상을 양의 방향으로 진행하는 레이저광(LY1)과, Y축 상을 음의 방향으로 진행하는 레이저광(LY2)(즉, 레이저광(LY1)의 진행 방향과는 반대 방향으로 진행하는 레이저광)으로 이루어진다.
- [0055] 레이저광쌍(LZ)은 Z축 상을 양의 방향으로 진행하는 레이저광(LZ1)과, Z축 상을 음의 방향으로 진행하는 레이저광(LZ2)(즉, 레이저광(LZ1)의 진행 방향과는 반대 방향으로 진행하는 레이저광)으로 이루어진다.
- [0056] 도 2에는 레이저광이 조사되는 영역(110)이 모식적으로 도시되어 있다. 또한, 도 3에는 교차 영역(112)이 파선으로 도시되어 있다. 교차 영역(112)은 3 세트의 레이저광쌍이 교차하는 영역이다. 교차 영역(112) 내에 존재하는 원자는 3 세트의 레이저광쌍과 상호 작용하고, 원자의 운동 방향과는 반대 방향으로부터 당해 원자에 복사압이 가해진다.
- [0057] 교차 영역(112) 내에서는, 4중극 자기장(B)에 의해 복사압에 공간 의존성이 생기고, 그 공간 의존성을 갖는 복사압이, 원자에 대해 4중극 자기장(B)의 중심점을 향한 복원력이 된다.
- [0058] 4중극 자기장(B)은, 상기의 한 쌍의 자석(자석(106, 108))에 의해 생성된다. 자석(106, 108)은, 예를 들면 링형상의 자석이다. 자석(106)의 중앙에는 자화 방향으로 자석(106)을 관통하는 구멍(106a)이 형성되어 있다. 동일하게, 자석(108)의 중앙에는 자화 방향으로 자석(108)을 관통하는 구멍(108a)이 형성되어 있다. 구멍(106a, 108a)의 형상은 원형이어도 되고 직사각형이어도 된다.
- [0059] 예를 들면, 자석(106, 108)은 Z축을 따라 자화된 영구 자석이다. 즉, 자화 방향이 Z축의 방향과 평행이 되도록, 자석(106, 108)이 Z축 상에 설치되어 있다. 구체적으로는, 자석(106, 108)은 교차 영역(112)의 중심(O)을 사이에 두고, 자석(106)의 자화 방향(106b)과 자석(108)의 자화 방향(108b)이 서로 반대 방향이 되도록 설치되어 있다. 자석(106)과 중심(O) 사이의 거리와, 자석(108)과 중심(O) 사이의 거리는 동등하다. 또한, 자석(106, 108)은 레이저광쌍(LX, LY)을 차단하지 않도록 교차 영역(112)에 근접한 위치에 설치되어 있다.
- [0060] 자석(106, 108)의 X축 방향의 폭 및 Y축 방향의 폭은 레이저광(LZ1, LZ2)의 직경보다 작다. 자석(106, 108)이 Z축 상에 설치됨으로써, 레이저광(LZ1, LZ2)의 각각의 일부가, 자석(106, 108)에 의해 마스킹된다. 그 결과, 교차 영역(112) 내에, 레이저광(LZ1, LZ2)이 조사되지 않는 영역(114)이 형성된다. 이 영역(114)은 자석(106, 108)에 의해 광이 마스킹되는 영역이며, 비원자 포착 공간의 일례에 상당한다.
- [0061] 즉, 자석(106, 108)은 3 세트의 레이저광쌍 중의 일부인 레이저광쌍(LZ)이 진행하는 광로 상에 설치되고, 레이저광쌍(LZ)(즉, 레이저광(LZ1, LZ2))의 일부를 부분적으로 마스킹한다. 이에 의해, 자석(106, 108)에 의해 마스킹되어 있지 않은 레이저광쌍(즉, 레이저광쌍(LX), 레이저광쌍(LY) 및 레이저광쌍(LZ) 중 마스킹되어 있지 않은 레이저광을 포함하는 레이저광쌍)과, 자석(106, 108)에 의해 형성되는 4중극 자기장(B)에 의해, 원자 포착 공간(102)이 형성된다. 또한, 자석(106, 108)에 의해 광이 마스킹된 공간에, 비원자 포착 공간인 영역(114)이 형성된다.
- [0062] 또한, 자기 광학 트랩 장치(100)는 제2 조사 장치(116)를 포함한다. 제2 조사 장치(116)는 레이저광을 출사하는 광원과, 광원으로부터 출사된 레이저광을 교차 영역(112)에 조사하기 위한 1 또는 복수의 광학 소자(예를 들면, 미러나, 빔 스플리터 등)를 포함한다. 제2 조사 장치(116)에 의해, 레이저광(118)을 교차 영역(112)에 조사된다. 레이저광(118)은 Z축 상을 따라 자석(106)의 구멍(106a)과 자석(108)의 구멍(108a)을 통해 원자 포획 공간(102)에 조사된다.
- [0063] 자석(106, 108)의 크기(예를 들면 직경)와 구멍(106a, 108a)의 크기(예를 들면 직경), 및 자기 광학 트랩용의 레이저광(레이저광(LZ1) 등)의 직경의 관계는 이하에 나타내는 관계가 된다.

- [0064] 구멍(106a, 108a)의 크기 < 자석(106, 108)의 크기 < 자기 광학 트랩용 레이저광의 직경
- [0065] 레이저광(118)은 원자를 광 트랩하기 위한 레이저광이다. 광 트랩의 일례로서, 광 전기장에 의해 유기된 쌍극자력에 의해 원자를 포착하는 방법을 들 수 있다. 이 방법이 사용되는 경우, 레이저광(118)으로서 광쌍극자 트랩용의 레이저광이 사용된다. 다른 예로서, 광의 정재파에 의해 원자를 포착하는 방법을 들 수 있다. 이 방법이 사용되는 경우, 레이저광(118)으로서 광격자용 레이저광이 사용된다. 또 다른 예로서, 공명 레이저광으로 이루어진 푸시 레이저광이, 레이저광(118)으로서 사용되어도 된다. 이 경우, 복사력에 의해 원자에 운동력을 부여할 수 있다.
- [0066] 또한, 3 세트의 레이저광이 제1 광군의 일례에 상당하고, 제1 조사 장치(104)와 자석(106, 108)이 제1 형성 수단의 일례에 상당하고, 자석(106, 108)이 제2 형성 수단의 일례에 상당하고, 제2 조사 장치(116)가 광조사 수단의 일례에 상당하고, 레이저광(118)이 제2 광의 일례에 상당한다.
- [0067] 이하, 자기 광학 트랩 장치(100)의 동작에 대해서 설명한다.
- [0068] 제1 조사 장치(104)에 의해 레이저광쌍(LX, LY, LZ)이 조사되어 교차 영역(112)이 형성된다. 또한, 자석(106, 108)에 의해 4중극 자기장(B)이 형성된다. 또한, 제2 조사 장치(116)에 의해 레이저광(118)이 원자 포착 공간(102)에 조사된다.
- [0069] 교차 영역(112) 내에 들어간 원자는 복원력이 되는 복사압을 받음으로써, 4중극 자기장(B)의 중심(O)을 향하여 감속하면서 이동한다.
- [0070] 상술한 바와 같이, 교차 영역(112) 내에는 자석(106, 108)에 의해 광이 마스크된 영역(114)이 존재한다. 영역(114)에는 레이저광쌍(LX, LY)이 조사되고, 레이저광쌍(LZ)은 조사되지 않는다. 이 영역(114) 내에서는 X 방향(+X 방향, -X 방향)에 대한 원자의 속도와 Y 방향(+Y 방향, -Y 방향)에 대한 원자의 속도는 감속되지만, Z 방향(+Z 방향, -Z 방향)에 대한 원자의 속도는 감속되지 않는다. 그 때문에, 영역(114) 내에 존재하는 원자는 Z 방향으로의 운동이 제한되지 않고, Z 방향을 향하여 확산된다. 도 2 중의 부호 "120"은 Z 방향으로의 운동이 제한되어 있지 않은 원자의 움직임을 가르키고 있다.
- [0071] Z 방향을 향하여 확산된 원자가 더욱 확산하면서, 광이 마스크된 영역(114)의 외측 또는 내측으로 이동한 것으로 가정한다.
- [0072] 영역(114)의 외측으로 이동한 원자에는 레이저광쌍(LZ)이 조사되므로, 영역(114)의 외측으로 이동한 원자는 레이저광쌍(LX, LY, LZ)과 4중극 자기장(B)에 의해 4중극 자기장(B)의 중심(O)의 방향으로 되돌아간다.
- [0073] 한편, 영역(114)의 내측으로 이동한 원자는 레이저광(118)과 상호 작용하는 것이 된다. 여기에서는 일례로서, 레이저광(118)은 -Z 방향을 향하여 조사되어 있다. 레이저광(118)이 푸시 레이저광인 경우, 원자는 복사압을 받아 -Z 방향으로 진행한다. 레이저광(118)이 광 트랩용의 레이저광인 경우, 광 트랩의 포텐셜을 외부로부터 제어함으로써, 원자를 -Z 방향으로 이동시킬 수 있다. -Z 방향으로 이동한 원자는 자석(108)의 구멍(108a)을 통과하여, 교차 영역(112)의 외측으로 압출된다.
- [0074] 이상과 같이, 유한의 확률로, 레이저광(118)의 진행 방향에 대한 운동량을 원자에 부여하고, 원자를 교차 영역(112)의 외측으로 이동시킬 수 있다. 교차 영역(112)의 외측으로 이동한 원자는 후단의 장치에 공급된다. 이에 의해, 냉각된 원자를 연속적으로 후단의 장치에 공급할 수 있다. 예를 들어, 원자 포착 공간(102) 내에 포착된 원자를 이동시키기 위해, 레이저광쌍(LX, LY, LZ)을 오프로 하지 않아도, 냉각된 원자를 후단의 장치에 공급할 수 있다.
- [0075] 제1 실시 형태의 구체예로서, 레이저광쌍(LX, LY, LZ)의 파장은 689 nm이다. 또한, 일례로서, 자석(106, 108)의 X 방향 및 Y 방향의 폭(외경)은 0.8 mm 정도이며, 구멍(106a, 108a)의 X 방향 및 Y 방향의 폭(내경)은 0.27 mm 정도이며, 자석(106)과 자석(108) 사이의 거리는 10 mm~15 mm 정도이다.
- [0076] 도 5 내지 도 8에는 자석(106)과 자석(108) 사이에 발생하는 자기장 분포의 계산값이 도시되어 있다.
- [0077] 도 5에 도시되어 있는 계산값은, YZ 면(Y축과 Z축에 의해 형성되는 면) 내에서의 자기장의 Y 성분의 계산값(BY(G))이다. 도 6에 도시되어 있는 계산값은 YZ면 내에서의 자기장의 Z 성분의 계산값(BZ(G))이다. 계산값이 농담으로 표현되어 있다.
- [0078] 도 7에는 Y축상에서의 자기장 성분의 계산값이 나타나 있다. 도 7 중의 횡축은 Y축 상의 위치를 나타내고 있고, 종축은 자기장의 계산값을 나타내고 있다. 부호 "122"는 자기장의 X 성분의 계산값(BX)과, 자기장의 Z

성분의 계산값(BZ)을 가리키고 있다. 부호 "124"는 자기장의 Y 성분의 계산값(BY)을 가리키고 있다. 부호 "126"이 가리키는 바와 같이, -2 mm 내지 +2 mm 사이에, +3.5 G/cm의 직선적인 자기장 구배가 형성되어 있다.

- [0079] 도 8에는 Z축상에서의 자기장 성분의 계산값이 도시되어 있다. 도 8 중의 횡축은 Z축상의 위치를 나타내고 있고, 종축은 자기장의 계산값을 나타내고 있다. 부호 "128"은 계산값(BX)과 계산값(BZ)을 가리키고 있다. 부호 "130"은 계산값(BY)을 가리키고 있다. -2 mm 내지 +2 mm 사이에 -7.1 G/cm의 직선적인 자기장 구배가 형성되어 있다.
- [0080] 도 7 및 도 8에 도시하는 바와 같이, 제1 실시 형태에서는 비교적, 작은 자기장 구배를 갖는 4중극 자기장이 형성된다. 이러한 4중극 자기장과 파장이 689 nm의 레이저광에 의한 자기 광학 트랩에 의해, 원자의 온도가 μK 정도가 될 때까지 원자가 냉각된다. μK 정도의 온도까지 냉각된 원자는 자기 광학 트랩 장치(100)로부터 후단의 장치에 공급된다.
- [0081] 이상과 같이, 링 형상의 자석(106, 108)이 레이저광쌍에 대한 마스크로서 기능하므로, 새로운 구성을 추가하지 않고, 냉각 원자를 자기 광학 트랩 장치(100)로부터 추출하여 후단의 장치에 공급할 수 있다. 또한, 각 구성의 정밀한 위치 조정이나 파라미터의 조정을 하지 않아도, 냉각 원자를 연속적으로 출사할 수 있다.
- [0082] 원자 기체가 마스크 부재에 부착되어 마스크 부재가 오염될 가능성이 있다. 마스크 부재가 구멍이 형성된 미러 등의 광학 소자인 경우, 그 오염에 의해 광학 소자의 광학 특성이 열화될 가능성이 있다. 이에 대하여, 구멍이 형성된 자석(106, 108)이 마스크로서 기능하므로, 광학 소자의 광학 특성이 열화된다는 문제가 발생하지 않는다.
- [0083] 도 9 및 도 10에는, 4중극 자기장(B)을 형성하는 한 쌍의 자석의 변형예가 도시되어 있다. 도 9 및 도 10은 변형예에 관한 자석을 도시하는 사시도이다.
- [0084] 도 9에 도시하는 예에서는, 자석(140, 142)에 의해 한 쌍의 자석이 구성된다. 자석(140, 142)은 각각 직사각형의 형상을 갖는다. 또한, 자석(140)에는 자화 방향으로 자석(140)을 관통하는 구멍(140a)이 형성되어 있다. 동일하게, 자석(142)에는 자화 방향으로 자석(142)을 관통하는 구멍(142a)이 형성되어 있다. 자석(140, 142)의 자화 방향은 자석(106, 108)의 자화 방향과 동일하다. 레이저광(118)은 구멍(140a, 142a)을 통하여 원자 포착 공간(102)에 조사된다. 상술한 제1 실시 형태와 동일하게, 자석(140, 142)의 크기(예를 들면 대각선의 길이)와, 구멍(140a, 142a)의 크기(예를 들면 직경)와, 자기 광학 트랩용 레이저광(레이저광(LZ1) 등)의 직경의 관계는 이하에 나타내는 관계가 된다.
- [0085] 구멍(140a, 142a)의 크기 < 자석(140, 142)의 크기 < 자기 광학 트랩용 레이저광의 직경
- [0086] 도 10에 도시하는 예에서는, 자석(144, 146)에 의해 한 쌍의 자석이 구성된다. 중심에 구멍(144a)이 형성되도록, 복수의 자석이 축 대칭으로 설치됨으로써 자석(144)이 구성된다. 동일하게 중심에 구멍(146a)이 형성되도록 복수의 자석이 축 대칭으로 설치됨으로써 자석(146)이 구성된다. 구체적으로는 자석(144, 146)은 각각 축 대칭으로 사분할된 자석이다. 자석(144, 146)의 자화 방향은 자석(106, 108)의 자화 방향과 동일하다. 레이저광(118)은 구멍(144a, 146a)을 통하여 원자 포착 공간(102)에 조사된다. 상술한 제1 실시 형태와 동일하게, 자석(144, 146)의 크기, 구멍(144a, 146a)의 크기, 및 자기 광학 트랩용 레이저광의 직경의 관계는 이하에 나타내는 관계가 된다.
- [0087] 구멍(144a, 146a)의 크기 < 자석(144, 146)의 크기 < 자기 광학 트랩용 레이저광의 직경
- [0088] 이하, 도 11을 참조하여 자기 광학 트랩 장치(100)를 포함하는 물리 패키지에 대하여 설명한다. 도 11은 물리 패키지(150)의 개략 구성을 도시하는 도면이다.
- [0089] 물리 패키지(150)는 원자 오븐(152), 제만 감속기(154) 및 자기 광학 트랩 장치(100)를 포함한다.
- [0090] 원자 오븐(152)은 시료가 수용되는 시료 용기, 히터, 온도계, 전기 커넥터, 캐필러리 노즐 및 열 복사 실드 등을 포함한다. 시료 용기 등은, 내부가 초고진공으로 유지되는 진공 용기 내에 수용된다. 히터에 의해 시료가 가열됨으로써, 시료로부터 원자 기체가 발생한다. 원자 기체는 캐필러리 노즐로부터 제만 감속기(154)를 향하여 출사한다. 원자 기체가 캐필러리 노즐로부터 출사함으로써, 지향성을 갖는 원자빔이 형성된다. 시료로서는 예를 들면, 스트론튬이나 이터븀 등이 사용되지만, 이들 이외의 원자가 시료로서 사용되어도 된다.
- [0091] 제만 감속기(154)는 보어와 자기장 발생기를 포함한다. 자기장 발생기는 솔레노이드 코일을 포함하고, 보어의 중심축을 따른 자기장을 발생시킨다. 원자 오븐(152)을 출사한 원자빔은 보어 내에 조사된다.

- [0092] 제만 감속기(154)는 제만 감속법을 이용함으로써, 원자 오븐(152)으로부터 출사한 큰 초속을 갖는 원자 빔의 속도를, 후단의 자기 광학 트랩 장치(100)를 포착할 수 있는 속도까지 감속시킨다.
- [0093] 보어 내에는, 원자 빔의 진행 방향과는 반대 방향으로부터 레이저광이 조사된다. 그 레이저광은 자기 광학 트랩용 레이저광으로서 병용되는 레이저광이어도 된다.
- [0094] 제만 감속기(154)에서는, 자기장 발생기가 발생시킨 자기장과 레이저광에 의해, 원자 오븐(152)으로부터 보어 내에 조사된 원자 빔의 속도가 감속된다. 고온의 원자빔은 자기장 발생기가 발생시킨 자기장과 레이저광에 의해 제만 감속법에 따라 감속하면서, 보어 내를 자기 광학 트랩 장치(100)를 향해 진행한다.
- [0095] 또한, 원자 오븐(152)과 제만 감속기(154)로서 공지의 원자 오븐과 제만 감속기를 사용할 수 있다.
- [0096] 상술한 바와 같이, 자기 광학 트랩 장치(100)는 진공 챔버를 포함하고, 진공 챔버 내는 초고진공으로 유지된다. 진공 챔버의 내부는 제만 감속기(154)의 보어 및 원자 오븐(152)의 진공 용기에 연결되어 있고, 보어 및 원자 오븐(152)의 진공 용기 내는 초고진공으로 유지된다. 자기 광학 트랩 장치(100)의 진공 챔버 내에 원자 포착 공간(102), 교차 영역(112) 및 영역(114)(비원자 포착 공간)이 형성된다.
- [0097] 이하, 물리 패키지(150)의 동작에 대해서 설명한다.
- [0098] 물리 패키지(150)에서는 진공 챔버의 내부가 진공화된다. 원자 오븐(152)으로부터 제만 감속기(154)에 출사된 원자빔은 제만 감속법에 따라 충분히 감속되어 자기 광학 트랩 장치(100)에 도달한다.
- [0099] 자기 광학 트랩 장치(100)에서는 상술한 바와 같이, 레이저광쌍(LX, LY, LZ)과 4중극 자기장(B)에 의해 원자가 포착되고, 레이저광(118)에 의해 극저온의 원자가 확률적으로 교차 영역(112)의 외측으로 이동하게 된다.
- [0100] 교차 영역(112)의 외측으로 이동한 극저온의 원자에 대하여, 예를 들면 광격자 트랩 등이 적용된다. 예를 들면, 광격자 광빔은 자기 광학 트랩 장치(100)의 진공 챔버 내에 입사하고, 진공 챔버 내에 설치된 광학 공진기에 의해 반사되며, 이에 의해 광격자 광빔의 진행 방향으로 정제파가 연속된 광격자 포텐셜이 형성된다. 원자 집단은 광격자 포텐셜에 포착된다.
- [0101] 파장을 약간 변화시킴으로써, 광격자를 광격자 광빔의 진행 방향으로 이동시킬 수 있다. 이 이동 광격자에 의한 이동 수단에 의해, 원자 집단은 시계 천이 공간까지 이동하게 된다.
- [0102] 시계 천이 공간에서는, 광 주파수를 제어한 레이저광을 원자에 조사하고, 시계 천이(즉 시계의 기준이 되는 원자의 공명 천이)의 고정밀도 분광을 실시하고, 원자 고유 또한 불변인 주파수를 계측한다. 이에 의해 정확한 원자 시계가 실현된다.
- [0103] 원자 시계의 정밀도를 높이기 위해서는 원자를 둘러싸는 섭동을 배제하고 주파수를 정확하게 읽어낼 필요가 있다. 특히 중요한 것은 원자의 열운동에 의한 도플러 효과가 야기하는 주파수 시프트의 제거이다. 광격자 시계에서는 시계 레이저의 파장에 비해 충분히 작은 공간에, 레이저광의 간섭에 의해 만드는 광격자로 원자를 가둠으로써 원자의 운동을 동결시킨다. 한편, 광격자 내에서는, 광격자를 형성하는 레이저광에 의해 원자의 주파수가 어긋난다. 그래서, 광격자 광빔으로서, 「마법 파장」 또는 「마법 주파수」라고 불리는 특정의 파장 및 주파수를 선택함으로써, 광격자가 공명 주파수에 미치는 영향을 제거한다.
- [0104] 시계 천이의 결과, 발광하는 광은 광학계 장치(14)에 의해 수광되고, 제어 장치(16)에 의해 분광 처리 등 되어 주파수가 구해진다.
- [0105] <제2 실시 형태에 관한 자기 광학 트랩 장치>
- [0106] 도 12를 참조하여, 제 2 실시 형태에 관한 자기 광학 트랩 장치(100A)에 대하여 설명한다. 도 12는 제2 실시 형태에 관한 자기 광학 트랩 장치(100A)의 개략 구성을 도시하는 단면도이다.
- [0107] 제2 실시 형태에 관한 자기 광학 트랩 장치(100A)는 제1 실시 형태에 관한 자기 광학 트랩 장치(100)의 구성에 추가하여, 또한 한 쌍의 보조 자석을 포함한다. 한 쌍의 보조 자석은 링 형상의 보조 자석(160, 162)으로 이루어진다. 보조 자석(160)의 중앙에는 자화 방향으로 보조 자석(160)을 관통하는 구멍(160a)이 형성되어 있다. 동일하게 보조 자석(162)의 중앙에는, 자화 방향으로 보조 자석(162)을 관통하는 구멍(162a)이 형성되어 있다. 보조 자석(160, 162)은 Z축을 따라 자화된 자석이다. 즉, 자화 방향이 Z축 방향과 평행이 되도록 보조 자석(160, 162)이 Z축 상에 설치되어 있다. 구체적으로는, 보조 자석(160, 162)은 교차 영역(112)의 중심(O)을 사이에 두고, 자석(106, 108)보다도 중심(O)으로부터 떨어진 위치에 설치되어 있다. 또한, 보조 자석(160, 162)

은 보조 자석(160)의 자화 방향과 보조 자석(162)의 자화 방향이 서로 반대 방향이 되도록 설치되어 있다. 보조 자석(160)과 중심(0) 사이의 거리와, 보조 자석(162)과 중심(0) 사이의 거리는 동등하다. 또한, 보조 자석(160)의 구멍(160a)의 직경과 보조 자석(162)의 구멍(162a)의 직경은 레이저광쌍(LZ)의 직경보다 크다. 레이저광쌍(LZ)은 구멍(160a, 162a)을 통하여 진행하고, 레이저광쌍(LZ)의 일부는 자석(106, 108)에 의해 마스크된다. 도 12에 도시된 예에서는, 일례로서 6 개{LX1, LX2, LY1, LY2, LZ1, LZ2}의 레이저광에 의해 교차 영역(112)이 형성되지만, 이는 일례에 불과하다. 또한, 도 12에는 보어(156)와 자기장 발생기(158)를 포함하는 제만 감속기(154)가 도시되어 있다.

- [0108] 제2 실시 형태에서는 비교적 큰 자기장 구배(예를 들면, 약 50 G/cm 정도)를 갖는 4중극 자기장이 형성된다. 이러한 4중극 자기장과 과장이 461 nm의 레이저광에 의해 구성되는 자기 광학 트랩에 의해, 원자의 온도가 mK 정도가 될 때까지 원자가 냉각된다. 이와 같은 강한 자기장 구배를 갖는 4중극 자기장을 발생시키기 위해, 자석(106, 108)으로서, 예를 들어 사마륨 코발트체의 강력한 자석이 사용된다. 제만 감속기(154)의 자기장 발생기(158)가 형성하는 자기장 분포와 자석(106, 108)이 형성하는 자기장 분포가 공간적으로 낭비없이 연결되도록, 보조 자석(160, 162)이 사용된다.
- [0109] 도 13에는 제2 실시 형태에 관한 자기 광학 트랩 장치(100A)에 의해 형성되는 자기장 분포의 계산 결과가 도시되어 있다. 횡축은 Z축 상의 위치를 나타내고 있고, 종축은 자기장의 계산값을 나타내고 있다. 부호 "166(실선)"은 이상적인 자기장의 계산 결과를 가리키고 있다. 부호 "168(원형 점)"은 자기 광학 트랩 장치(100A)에 의해 얻어지는 자기장의 계산 결과를 가리키고 있다. 도 13에서는, 부호 "166"이 나타내는 값과 부호 "168"이 나타내는 값은 거의 일치하고 있다.
- [0110] 도 14에는 이상적인 자기장의 계산 결과와 자기 광학 트랩 장치(100A)에 의해 얻어지는 자기장의 계산 결과의 차가 나타나 있다. 횡축은 Z축 상의 위치를 나타내고 있고, 종축은 차를 나타내고 있다.
- [0111] 제2 실시 형태에 의하면, 자석(106, 108)과 보조 자석(160, 162)을 사용함으로써, 이상적인 자기장 분포를 형성할 수 있다.
- [0112] 또한, 중심(0)에 형성되는 자기장 구배의 크기의 계산값은 35 G/cm이며, 비교적 큰 자기장 구배를 갖는 4중극 자기장을 형성하는 것이 가능해진다. 이에 의해, mK 정도의 온도까지 냉각된 원자를 출력하는 것이 가능해진다.
- [0113] 보조 자석(160, 162)의 자화 방향은 자석(106, 108)의 자화 방향과 동일한 방향이어도 되고, 보조 자석(160, 162)의 자화 방향은 동경(動徑) 방향이어도 된다.
- [0114] 원통상의 형상을 갖는 자석을 $2n(n \geq 2)$ 개로 분할함으로써 얻어진 한 쌍의 자석을, 보조 자석(160, 162)으로서 사용해도 된다. 분할에 의해 보조 자석(160, 162)과 레이저광쌍(LX, LY)이 간섭하기 어려워진다. 다른 예로서, 4중극 자기장을 형성하도록, 막대 자석이나 원기둥 자석 등을 대칭적인 위치에 설치해도 된다.
- [0115] 제2 실시 형태에서, 자석(106, 108)은 소프트 자석이어도 된다. 예를 들어, 보조 자석(160, 162)으로부터 나온 자력선이, 소프트 자석인 자석(106, 108)에 의해 묶이고, 중심(0) 부근에 4중극 자기장이 형성되도록, 소프트 자석의 형상이 설계된다. 또한, 보조 자석(160, 162) 대신, 반헬름홀츠 코일을 이용하여 자기장 분포를 조정해도 된다.
- [0116] 상술한 제1 및 제2 실시 형태에서는, 제1 광군에 상당하는 예로서, 서로 직교하는 3 세트의 레이저광쌍(LX, LY, LZ)을 예로 들어 설명하였다. 도 15에는 제1 광군에 상당하는 다른 예가 도시되어 있다. 도 15에 도시한 바와 같이, 총 5 개의 레이저광의 조합{LXY1, LXY2, LXY3, LZ1, LZ2}이 제1 광군으로서 사용되어도 된다. 레이저광(LZ)은 Z축상을 양의 방향으로 진행하는 레이저광(LZ1)과, Z축상을 음의 방향으로 진행하는 레이저광(LZ2)으로 이루어진다. 레이저광(LXY1)은 X축 상을 양의 방향으로 진행하는 레이저광이다. 레이저광(LXY2)은, 레이저광(LXY1)을 XY면 상에서 중심(0)의 둘레에 +120 도 회전시킨 레이저광이다. 레이저광(LXY3)은 레이저광(LXY1)을 XY면 상에서 중심(0)의 둘레에 -120도 회전시킨 레이저광이다. 5 개의 레이저광의 조합을 이용한 자기 광학 트랩은 일본 특허 출원 제2022-014486 호에서 제안되었다.
- [0117] 상술한 제1 및 제2 실시 형태에서, 미러에 의해 1 개의 레이저광으로부터 레이저광쌍(LZ)이 생성되어도 된다. 이 경우, 냉각 원자를 후단의 장치에 공급하기 위해, 당해 미러의 중앙에, 냉각 원자를 통과시키기 위한 구멍이 형성되어도 된다. 다른 예로서, 냉각 원자를 후단의 장치에 공급하기 위해, 공명 레이저광으로 이루어지는 디플렉터가 사용되어도 된다. 디플렉터는 냉각 원자를 임의의 방향으로 구부리는 기능을 갖는다.

- [0118] <제3 실시 형태에 관한 자기 광학 트랩 장치>
- [0119] 이하, 도 16을 참조하여, 제3 실시 형태에 관한 자기 광학 트랩 장치(100B)에 대하여 설명한다. 도 16은 제3 실시 형태에 관한 자기 광학 트랩 장치(100B)의 개략 구성을 도시하는 단면도이다.
- [0120] 제3 실시 형태에 관한 자기 광학 트랩 장치(100B)는 4중극 자기장(B)을 형성하는 한 쌍의 자석과, 한 쌍의 마스크 부재를 포함한다. 한 쌍의 자석은 링 형상의 자석(170, 172)으로 이루어진다. 한 쌍의 마스크 부재는 링 형상의 마스크 부재(174, 176)로 이루어진다. 또한, 마스크 부재(174, 176)는 제2 형성 수단의 일레에 상당한다.
- [0121] 자석(170)의 중앙에는 자화 방향으로 자석(170)을 관통하는 구멍(170a)이 형성되어 있다. 자석(172)의 중앙에는, 자화 방향으로 자석(172)을 관통하는 구멍(172a)이 형성되어 있다. 제3 실시 형태에서는 자석(170, 172)은 X축을 따라 자화된 자석이다. 즉, 자화 방향이 X축의 방향과 평행해지도록 X축 상에 설치되어 있다. 구체적으로는, 자석(170, 172)은 교차 영역(112)의 중심(O)을 사이에 두고, 자석(170)의 자화 방향과 자석(172)의 자화 방향이 서로 반대 방향이 되도록 설치되어 있다. 자석(170)과 중심(O) 사이의 거리와, 자석(172)의 중심(O)과의 사이의 거리는 동등하다. 또한, 구멍(170a, 172a)의 직경은 레이저광쌍(LX)의 직경보다 크다. 자석(170, 172)은 레이저광쌍(LY, LZ)의 진행을 방해하지 않도록 설치된다. 즉, 자석(170)과 자석(172) 사이의 길이는 레이저광쌍(LY, LZ)의 직경보다 길다.
- [0122] 마스크 부재(174)의 중앙에는 마스크 부재(174)의 두께 방향으로 관통하는 구멍(174a)이 형성되어 있다. 마스크 부재(176)의 중앙에는 마스크 부재(176)의 두께 방향으로 관통하는 구멍(176a)이 형성되어 있다. 마스크 부재(174, 176)는 교차 영역(112)의 중심(O)을 사이에 두고 Z축 상에 설치되어 있다. 마스크 부재(174)와 중심(O) 사이의 거리와, 마스크 부재(176)와 중심(O) 사이의 거리는 동등하다. 마스크 부재(174, 176)의 외경은 레이저광쌍(LZ)의 직경보다 작다. 레이저광쌍(LZ)의 일부는 마스크 부재(174, 176)에 의해 마스크된다.
- [0123] 원자를 광 트랩하기 위한 레이저광(118)은 마스크 부재(174)의 구멍(174a)과 마스크 부재(176)의 구멍(176a)을 통하여 원자 포착 공간에 조사된다.
- [0124] 마스크 부재(174, 176)는 상(常)자성 물질로 이루어진다. 상자성 물질은 광학적인 작용을 하지 않고, 레이저광쌍(LZ)의 일부를 마스크할 수 있다. 마스크 부재(174, 176)는 마스크하는 데에만 사용되므로, 마스크 부재(174, 176)의 교차 영역(112)측의 면이 원자 기체에 의해 오염되어도 문제는 발생하지 않는다.
- [0125] 자기 광학 트랩 장치(100B)는 또한 미러(178, 180)를 포함한다. 미러(178)의 중앙에는, 미러(178)의 두께 방향으로 관통하는 구멍(178a)이 형성되어 있다. 미러(178)는 Z축상에서 마스크 부재(176)보다 중심(O)으로부터 떨어진 위치에 설치되어 있다. 레이저광(118)은 구멍(178a)을 통하여 진행한다. 레이저광쌍(LZ)에 포함되는 일방의 레이저광(예를 들면 레이저광(LZ2))이 미러(178)에 의해 반사됨으로써, 타방의 레이저광(예를 들면 레이저광(LZ1))이 생성된다.
- [0126] 미러(180)는 X축상에서 자석(172)보다 중심(O)으로부터 떨어진 위치에 설치되어 있다. 레이저광쌍(LX)에 포함되는 일방의 레이저광이 미러(180)에 의해 반사됨으로써, 타방의 레이저광이 생성된다.
- [0127] 또한, 미러(178, 180)는 레이저광쌍을 생성하는 광학 소자의 일레에 지나지 않고, 다른 광학 소자(예를 들면, 빔 스플리터 등)를 사용함으로써 레이저광쌍이 생성되어도 된다. 제1 및 제2 실시 형태에서도 동일하다.
- [0128] 제3 실시 형태에서도 상술한 제1 및 제2 실시 형태와 동일하게, 유한 확률로, 레이저광(118)의 진행 방향에 대한 운동량을 원자에 부여하여, 원자를 교차 영역(112)의 외측으로 이동시킬 수 있다.
- [0129] 이하, 도 17 및 도 18을 참조하여 링 형상의 자석(예를 들면, 자석(106, 108 등))의 실장 방법에 대해서 설명한다. 도 17 및 도 18은 링 형상의 자석을 도시하는 단면도이다. 예를 들면, 광을 투과하는 유리나 사파이어 등의 원반 플레이트에, 링 형상의 자석을 첩부하고, 그 원반 플레이트를 자기 광학 트랩 장치에 의해 지지하는 수법이 생각된다.
- [0130] 도 17에 도시하는 예에서는, 중앙에 구멍(204a)이 형성된 원반 플레이트(204)의 일방의 면에 자석(200)이 설치되어 있고, 원반 플레이트(204)의 반대측의 면에 자석(202)이 설치되어 있다. 자석(200, 202)은 원반 플레이트(204)를 사이에 두고, 자신의 자기력에 의해 원반 플레이트(204)에 고정되어 있다.
- [0131] 도 18에 도시하는 예에서는, 아웃 가스가 적은 접착제 또는 인듐 초음파 땀납에 의해, 자석(200)이 원반 플레이트(204)에 고정되어 있다.

[0132] 또 다른 예로서, 유리 상에 금속 패턴을 도금하고, 그 패턴에 인듐 뿔납에 의해 자석(200)을 부착해도 된다.

[0133] 이상의 설명에서는 광격자 시계를 예로 들었다. 그러나, 상술한 각 실시 형태의 기술은 당업자라면 광격자 시계 이외에도 적용 가능하다. 구체적으로는, 광격자 시계 이외의 원자 시계, 또는 원자를 사용한 간접계인 원자 간접계에도 적용 가능하다. 예를 들어, 자기 광학 트랩 장치(100), 자기 광학 트랩 장치(100A) 또는 자기 광학 트랩 장치(100B)를 포함하는 원자 시계용의 물리 패키지나, 원자 간접계용 물리 패키지가 구성되어도 된다. 또한, 제1 내지 제3 실시 형태는 원자 또는 이온화된 원자에 대한 각종의 양자 정보 처리 디바이스에도 적용 가능하다. 양자 정보 처리 디바이스란, 원자나 광의 양자 상태를 이용하여 계측, 센싱 및 정보 처리를 실시하는 장치를 말하며 원자 시계, 원자 간접계 외에, 자기장계, 전기장계, 양자 컴퓨터, 양자 시뮬레이터, 양자 증계기 등을 예시할 수 있다. 양자 정보 처리 디바이스의 물리 패키지에서는 제1 내지 제3 실시 형태의 기술을 이용함으로써, 광격자 시계의 물리 패키지와 동일하게, 소형화 또는 가반화를 달성할 수 있다. 또한, 이러한 디바이스에서는 시계 천이 공간은 시계 계측을 목적으로 하는 공간이 아니라, 단순히 시계 천이 분광을 일으키는 공간으로서 취급되는 경우가 있는 것에 유의하기 바란다.

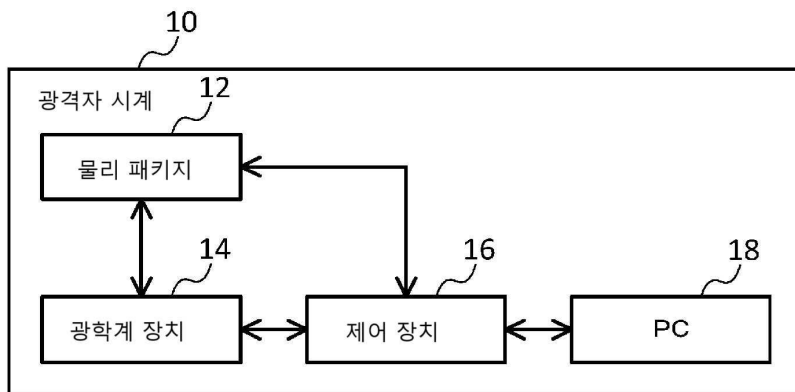
[0134] 이상의 설명에 있어서는 이해를 용이하게 하기 위해 구체적인 형태에 대해서 나타내었다. 그러나, 이들은 실시 형태를 예시하는 것이며, 그 밖에도 다양한 실시 형태를 취하는 것이 가능하다.

부호의 설명

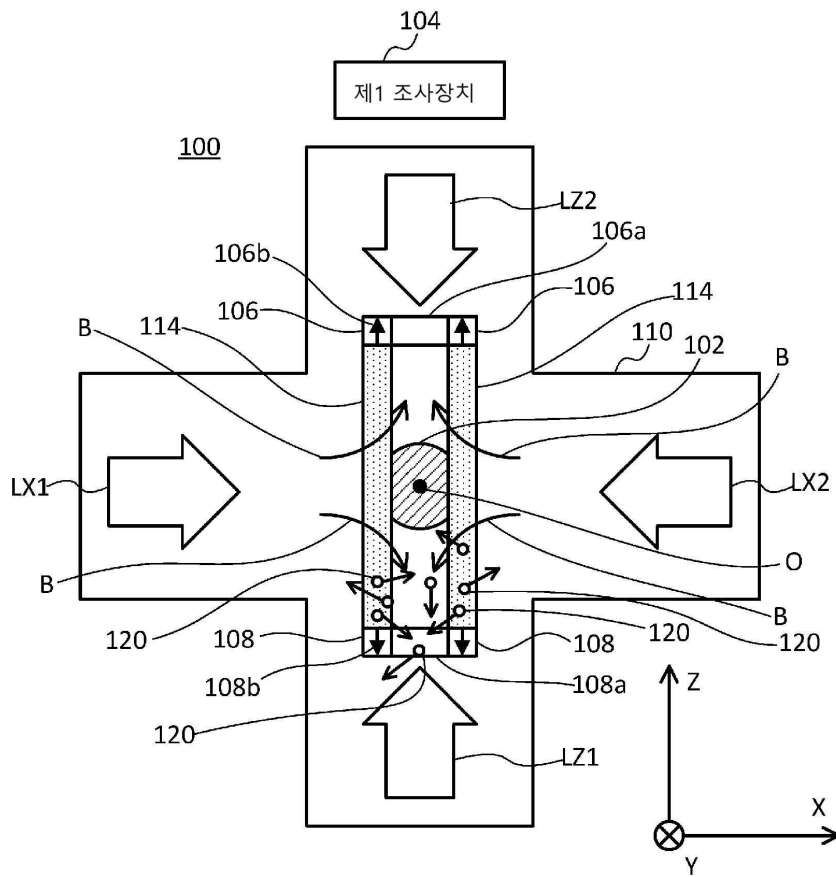
- [0135] 100, 100A, 100B: 자기 광학 트랩 장치
- 102: 원자 포착 공간
- 104: 제1 조사 장치
- 106, 108: 자석
- 112: 교차 영역
- 116: 제2 조사 장치
- 118: 레이저광

도면

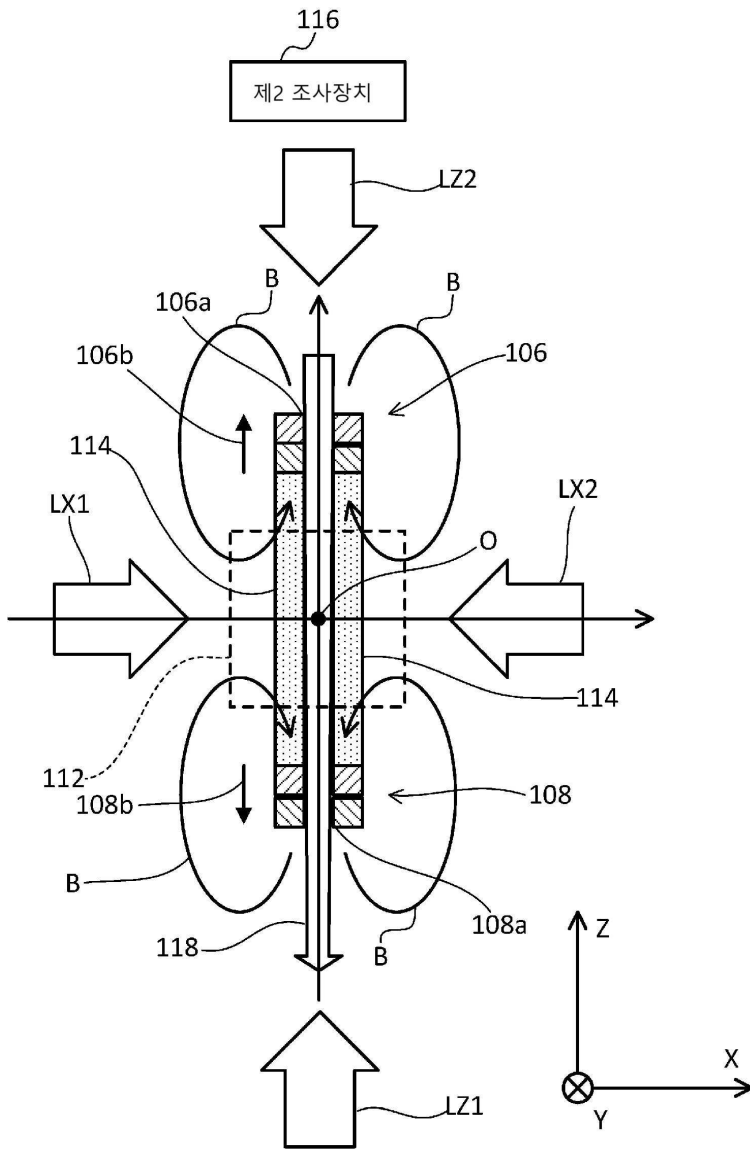
도면1



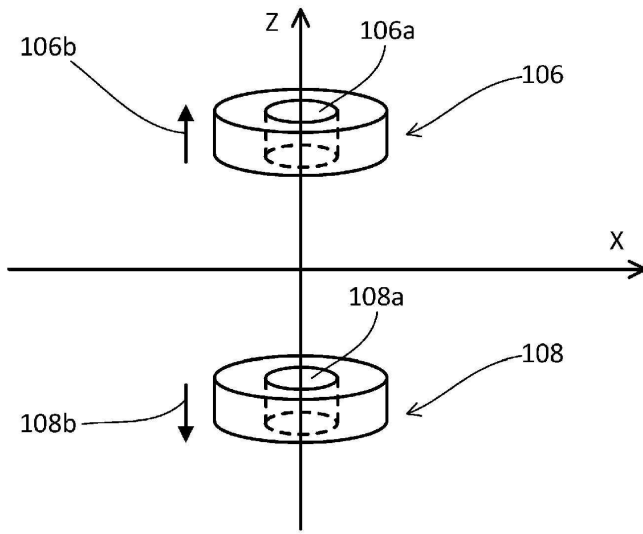
도면2



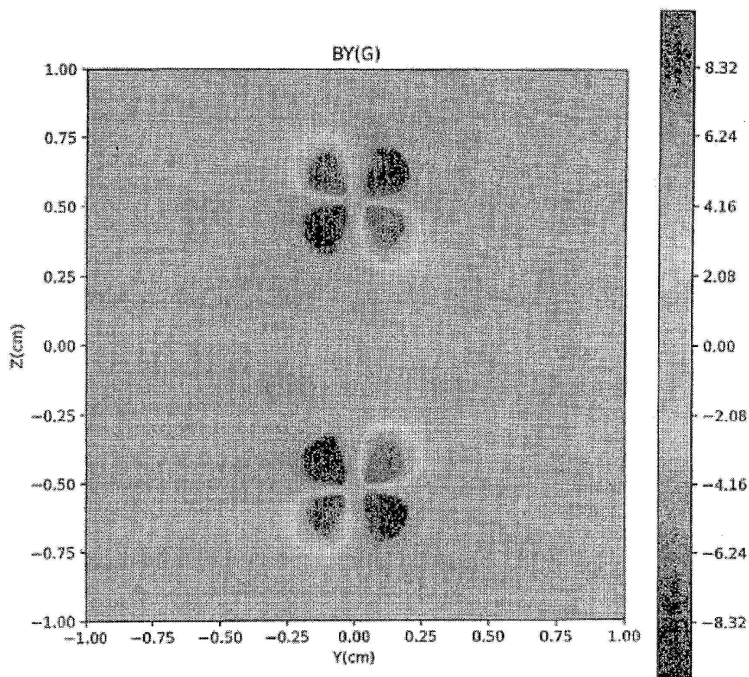
도면3



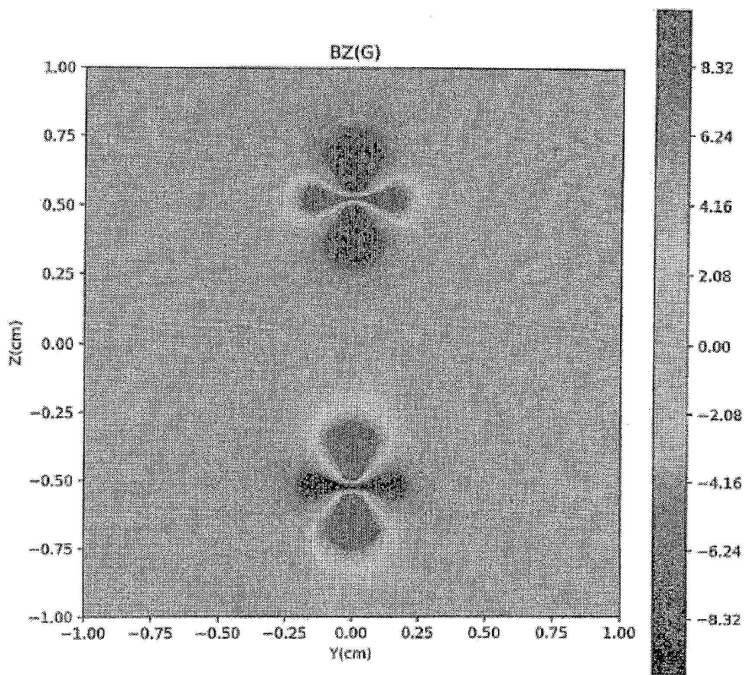
도면4



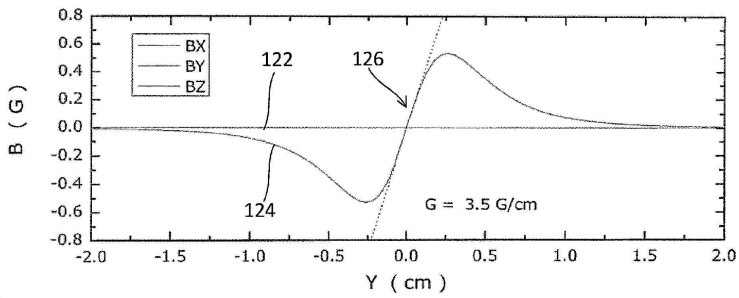
도면5



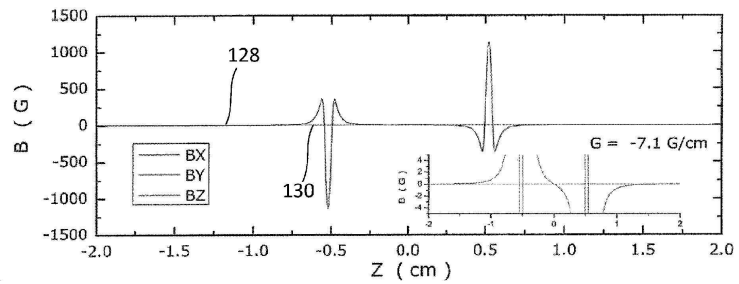
도면6



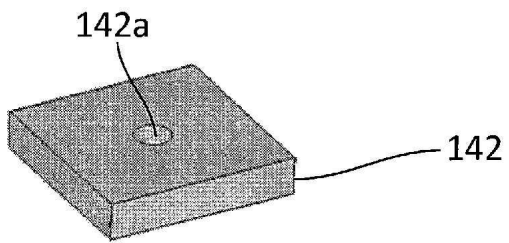
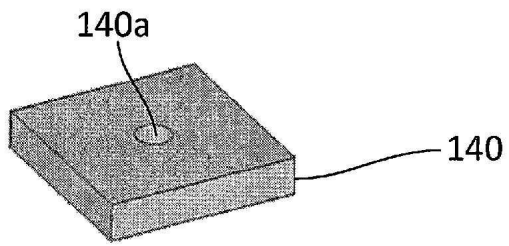
도면7



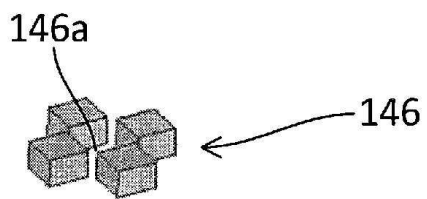
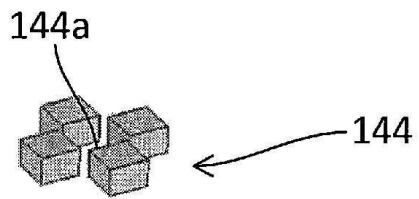
도면8



도면9



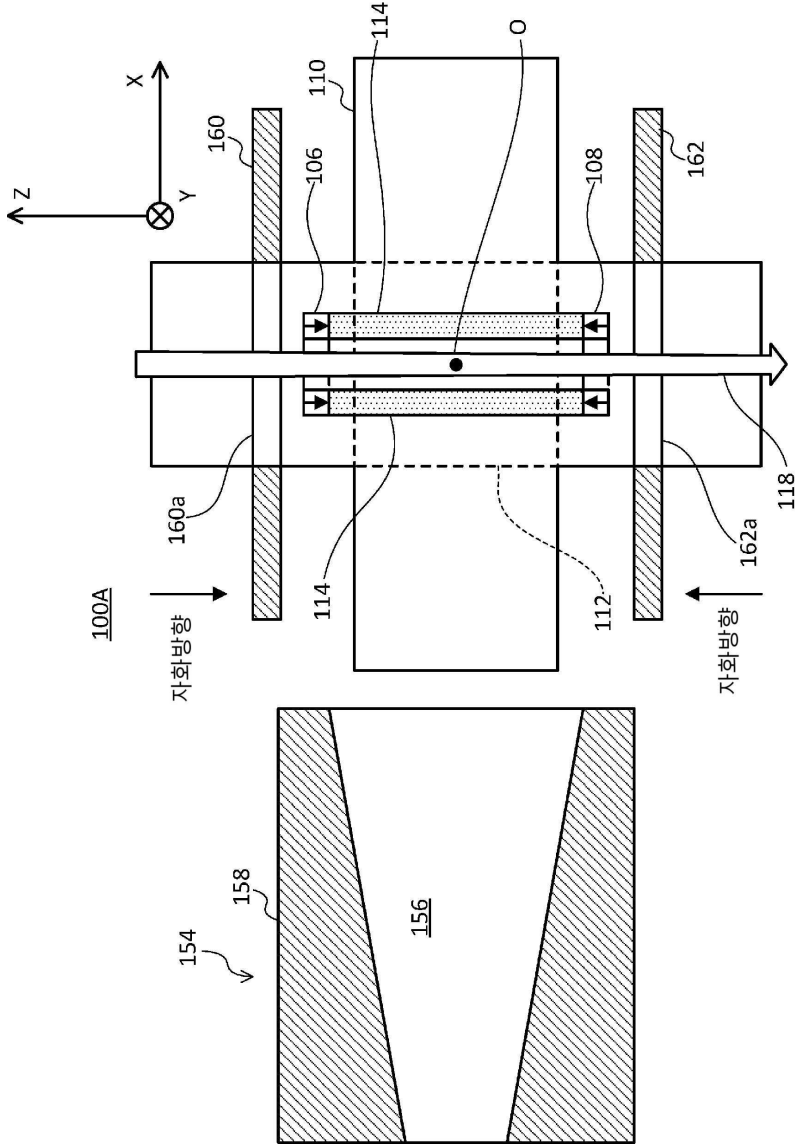
도면10



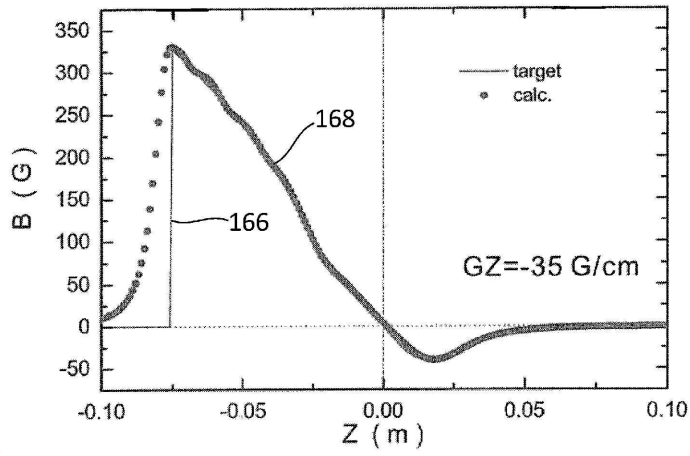
도면11



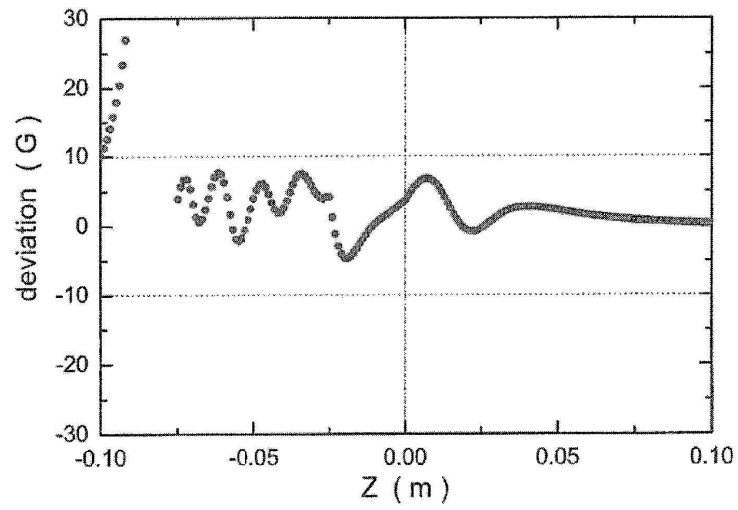
도면12



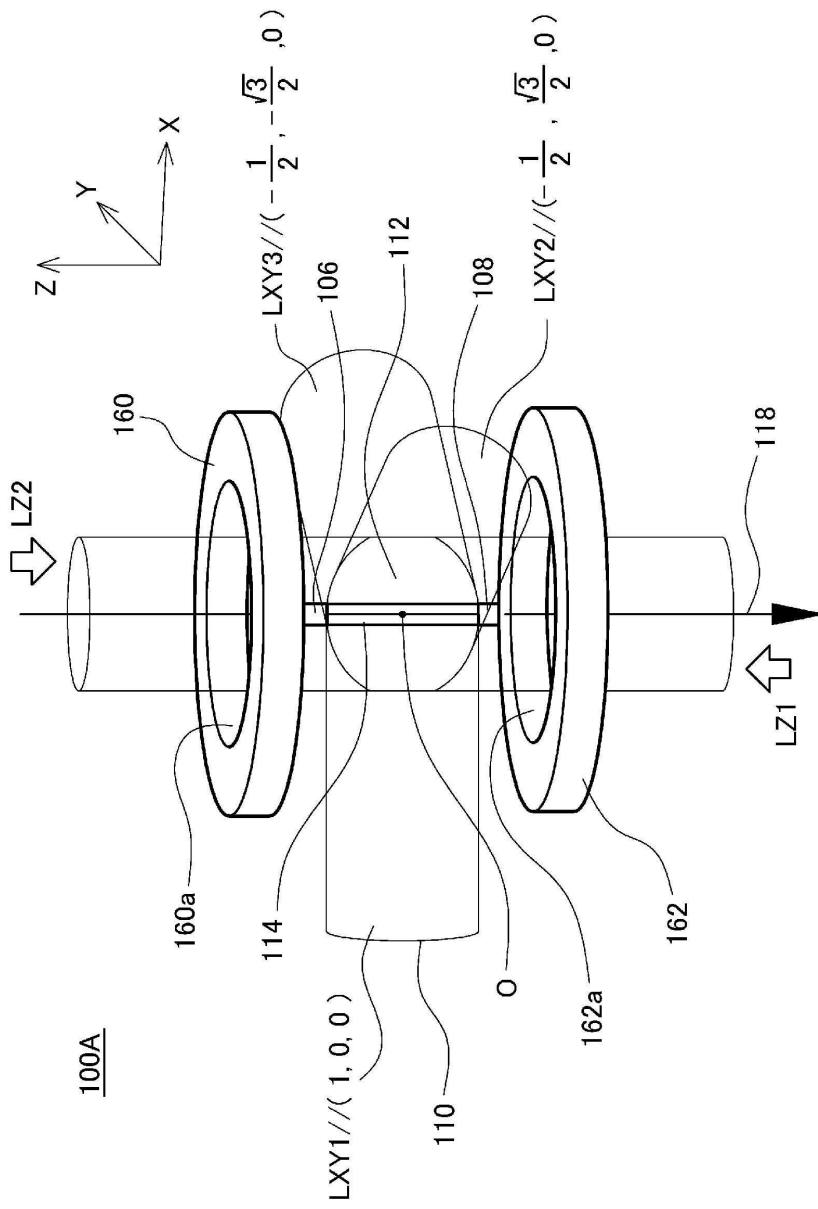
도면13



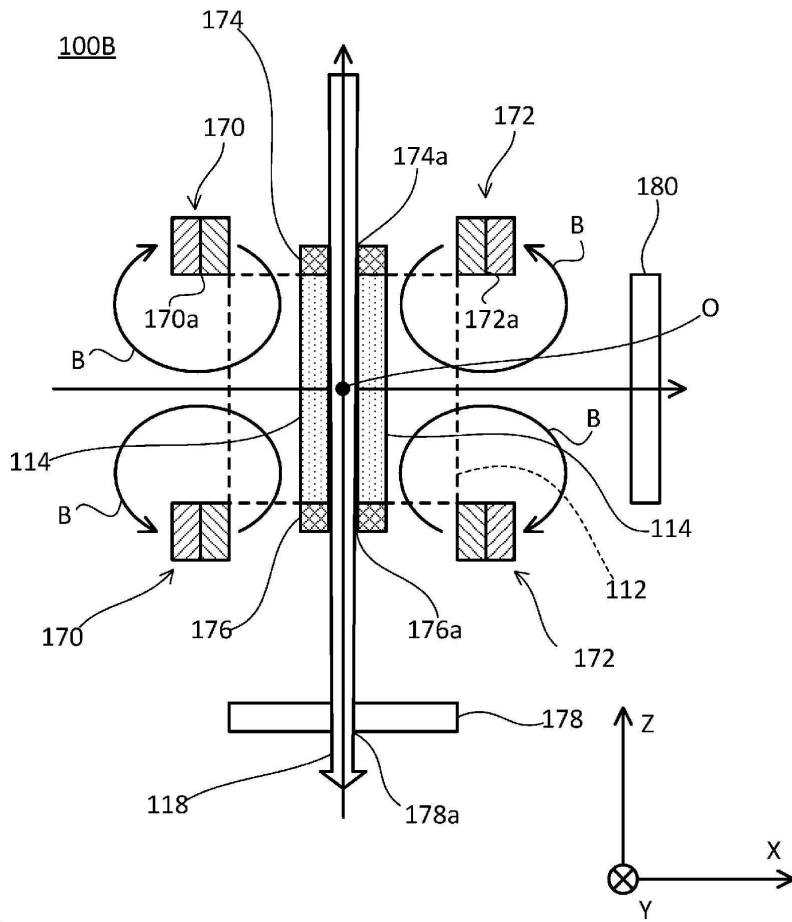
도면14



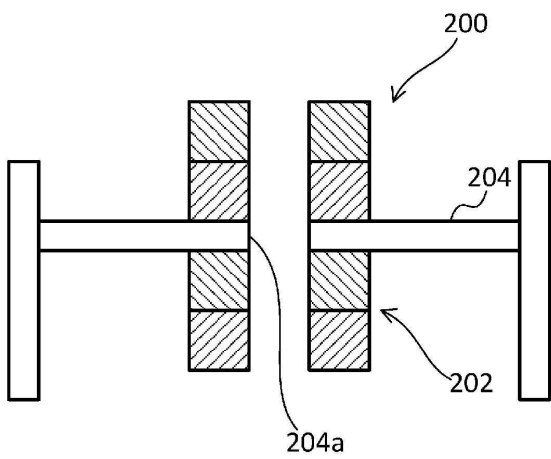
도면15



도면16



도면17



도면18

