

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
05. August 2021 (05.08.2021)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2021/151575 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
G02B 5/09 (2006.01) *G04F 5/14* (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2020/086036

(22) Internationales Anmeldedatum:
14. Dezember 2020 (14.12.2020)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2020 102 222.0
30. Januar 2020 (30.01.2020) DE

(71) Anmelder: **BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND, VERTRETEN DURCH DAS BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE, [DE/DE]**; dieses vertreten durch den Präsidenten der Physikalisch-Techni-

nischen Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig (DE).

(72) Erfinder: **LISDAT, Christian**; Ricklinger Stadtweg 4c, 30459 Hannover (DE). **LEOPOLD, Tobias**; Fischerstraße 17, 30167 Hannover (DE). **BONDZA, Saskia**; Friesenstraße 41, 30161 Hannover (DE).

(74) Anwalt: **GRAMM, LINS & PARTNER PATENT- UND RECHTSANWÄLTE PARTGMBB**; Theodor-Heuss-Straße 1, 38122 Braunschweig (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI,

(54) Title: ATOM COOLING DEVICE, IN PARTICULAR AN ATOM TRAP, AND METHOD FOR COOLING OR TRAPPING ATOMS

(54) Bezeichnung: ATOMKÜHLVORRICHTUNG; INSBESONDERE ATOMFALLE; UND VERFAHREN ZUM KÜHLEN ODER EINFANGEN VON ATOMEN

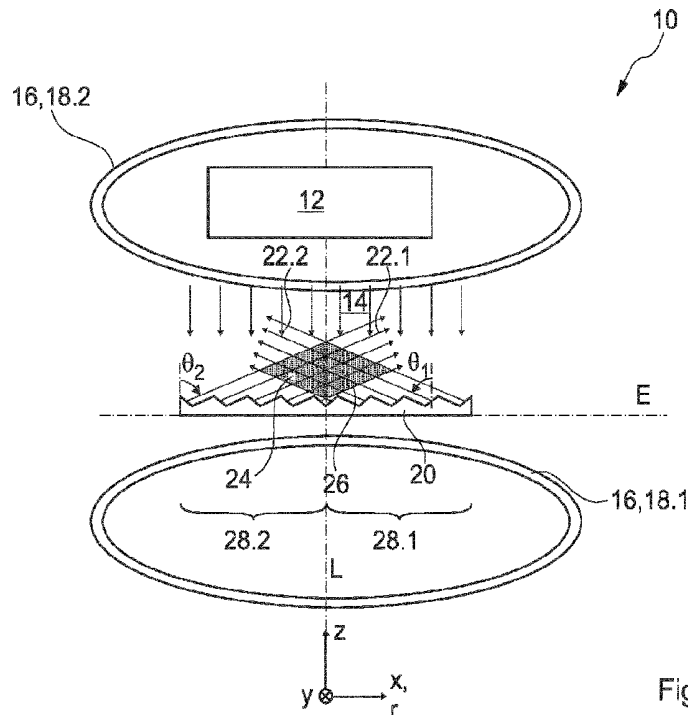


Fig. 1a

(57) Abstract: The invention relates to an atom cooling device (10), in particular an atom trap, comprising: (a) a laser system (12) for emitting a laser beam (14); (b) a magnetic quadrupole-field generator (16); and (c) a light reflector, which is arranged to reflect the laser beam (14) such that a trap volume (26) is formed, wherein the light reflector is a Fresnel reflector (20).

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Atomkühlvorrichtung (10), insbesondere Atomfalle, mit (a) einem Lasersystem (12) zum Aussenden eines Laserstrahls (14), (b) einem magnetischen Quadrupolfeld-Erzeuger (16) und (c) einem Lichtreflektor, der angeordnet ist zum Reflektieren des Laserstrahls (14), sodass sich ein Fallenvolumen (26) bildet, wobei der Lichtreflektor ein Fresnel-Reflektor (20) ist.

WO 2021/151575 A1

NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU,
RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM,
TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM,
ZW.

- (84) Bestimmungsstaaten** (*soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart*): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Erklärungen gemäß Regel 4.17:

- *hinsichtlich der Berechtigung des Anmelders, ein Patent zu beantragen und zu erhalten (Regel 4.17 Ziffer ii)*

Veröffentlicht:

- *mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)*

Atomkühlvorrichtung, insbesondere Atomfalle, und Verfahren zum Kühlen oder Einfangen von Atomen

Die Erfindung betrifft eine Atomkühlvorrichtung, insbesondere magneto-optische Atomfalle, mit (a) einem Lasersystem zum Aussenden eines Laserstrahls, und (b) einem Lichtreflektor, der angeordnet ist zum Reflektieren des Laserstrahls, sodass sich ein Fallenvolumen bildet. Vorzugsweise besitzt die magneto-optische Atomfalle einen magnetischen Quadrupolfeld-Erzeuger. Gemäß einem zweiten Aspekt betrifft die Erfindung ein Verfahren zum Kühlen und/oder Einfangen von Atomen.

Atomkühlvorrichtungen, insbesondere Atomfallen, werden verwendet, um eine vergleichsweise geringe Anzahl an Atomen, in der Regel einige wenige Millionen Atome, so stark abzubremsen und – wenn es sich um eine Atomfalle handelt – mittels des Quadrupol-Magnetfelds zu fangen, dass sie sich in einem vorgegebenen Volumen, dem Fallenvolumen, für eine so lange Zeit aufhalten, dass sie untersucht werden können. Beispielsweise kann eine derartige Atomfalle ein Bestandteil einer Atomuhr, insbesondere einer optischen Atomuhr, oder eines Atomgravimeters sein, die ebenfalls erfindungsgemäße Gegenstände darstellen.

Die GB 2558574 A betrifft ein optisches Element mit einer Vielzahl optischer Bestandteile. Jeder optische Bestandteil weist hierbei ein Profil in einer, zwei oder drei Dimensionen auf. Das optische Element ist zur Verwendung insbesondere in MOTs geeignet.

Die US 2017/0359888 A1 betrifft ein 2D-MOT auf der Grundlage eines optischen Gitters. Das 2D GMOT ist dabei geeignet, einen Strahl kalter Atome zu entsenden, insbesondere in das Fallenvolumen eines 3D GMOT.

In „Laser cooling with a single laser beam and a planar diffractor“ zeigen Vangeleyn et al. die Verwendung dreier Beugungsgitter, um einen einzelnen Laserstrahl in eine tetraedrische magneto-optische Falle mit vier Laserstrahlen zu verwandeln.

- 5 In „A surface-patterned chip as a strong source of ultra-cold atoms for quantum technologies “ zeigen Nshii et al. die Verwendung eines Chips, auf dem stabile optische Gitter erzeugt werden können.

Um die Eigenschaften der Atome im Fallenvolumen messen zu können, muss das
10 Fallenvolumen für Laserstrahlen zugänglich sein. Je besser zugänglich das Fallenvolumen ist, desto besser. Es ist zudem häufig wünschenswert, die Atomkühlvorrichtung möglichst einfach aufzubauen, um den Aufwand bei Herstellung und Betrieb möglichst gering zu halten.

- 15 Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, Nachteile im Stand der Technik zu vermindern.

Die Erfindung löst das Problem durch eine gattungsgemäße Atomkühlvorrichtung, insbesondere Atomfalle, bei welcher der Lichtreflektor ein Fresnel-Reflektor ist.

20

- Gemäß einem zweiten Aspekt löst die Erfindung das Problem durch ein Verfahren zum Kühlen und/oder Einfangen von Atomen, das die folgenden Schritte aufweist:
(a) Leiten zumindest eines Laserstrahls auf einen Fresnel-Reflektor, sodass reflektierte Laserstrahlen entstehen, (b) wobei der Fresnel-Reflektor so ausgebildet ist,
25 dass durch das Bestrahlen des Fresnel-Reflektors mit dem Laserstrahl ein Fallenvolumen entsteht, wobei das Fallenvolumen derjenige Raumbereich ist, für den gilt, dass durch ihn zumindest drei, insbesondere zumindest vier, Laserstrahlen verlaufen, die so orientiert sind, dass ein Atom im Fallenvolumen gefangen wird, und
(c) Laden zumindest eines Atoms in das Fallenvolumen, wobei eine Wellenlänge des
30 zumindest einen Laserstrahls so gewählt ist, dass das zumindest eine Atom durch den Laserstrahl und die reflektierten Laserstrahlen gekühlt wird und vorzugsweise durch die Kombination aus Quadrupol-Magnetfeld und Laserstrahlen eine Rückstellkraft auf Atome im Fallenvolumen auf das Zentrum hin ausgeübt wird.

Vorteilhaft an einer derartigen Atomfalle ist, dass das Fallenvolumen in der Regel gut von außen, beispielsweise mittels Laser und/oder Atomstrahl, zugänglich ist. In anderen Worten ist der Raumwinkelbereich, unter dem ein Laserstrahl auf das Fallenvolumen gerichtet werden kann, in der Regel größer als bei bekannten Atomkühlvorrichtungen mit achromatischen Eigenschaften.

Günstig ist zudem, dass die Reflexionseigenschaften des Fresnel-Reflektors weitgehend unabhängig von der Wellenlänge des Laserstrahls sind. Das ist ein Vorteil gegenüber magneto-optischen Atomfallen auf der Basis von Gittern. Derartige Atomfallen werden bislang verwendet, wenn das Fallenvolumen besonders gut zugänglich sein soll. In diesem Fall ist aber das Fallenvolumen abhängig von der Wellenlänge des Laserstrahls. Das ist insbesondere dann nachteilig, wenn – wie gemäß einer bevorzugten Ausführungsform vorgesehen – das Lasersystem zum Aussenden zweier Laserstrahlen unterschiedlicher Wellenlängen ausgebildet ist.

Im Rahmen der vorliegenden Beschreibung wird unter einer Atomkühlvorrichtung insbesondere eine Vorrichtung verstanden, mittels der Atome auf eine Geschwindigkeit von höchstens 10 m pro Sekunde, insbesondere höchstens 5 m pro Sekunde, abgekühlt werden können. Insbesondere ist die Atomkühlvorrichtung so ausgebildet, dass die Atome durch Laserkühlung auf diese Geschwindigkeit gebracht werden.

Unter dem Lichtreflektor wird insbesondere ein Bauteil verstanden, das Laserstrahlen nicht-diffus reflektiert.

Der Fresnel-Reflektor ist vorzugsweise einstückig hergestellt. Es ist insbesondere möglich, dass die Reflexionsbereiche, die weiter unten beschrieben werden, an einem einstückigen Bauteil ausgebildet sind. Es ist auch möglich, dass der Fresnel-Reflektor aus mehreren Bauteilen aufgebaut ist, wobei jedes Bauteil einen Reflexionsbereich bildet und wobei alle Bauteile miteinander verbunden sind. Zwar ist es möglich, den Fresnel-Reflektor auch nicht einstückig herzustellen oder die Reflexionsbereiche nicht an einem einstückigen Bauteil auszubilden, das führt aber in der Regel

dazu, dass der Fresnel-Reflektor aufwändiger auszurichten ist und eine geringere Stabilität haben kann.

Der Fresnel-Reflektor ist, insbesondere wenn er aus Metall aufgebaut ist, vorzugsweise durch Spanen oder Walzen hergestellt. Wenn er aus Glas aufgebaut ist, ist er vorzugsweise durch Ätzen hergestellt. Es ist zudem möglich, dass der Fresnel-Reflektor durch Ätzen einer dielektrischen Schicht hergestellt wird, die auf einem Substrat, insbesondere einem metallischen Substrat, aufgebracht ist.

10 Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform besitzt der Fresnel-Reflektor ein erstes Segment, in dem eine Mehrzahl an Erstsegment-Reflexionsbereichen angeordnet ist, und zumindest ein zweites Segment, in dem eine Mehrzahl an Zweitsegment-Reflexionsbereichen angeordnet ist. Die Reflexionsbereiche sind diejenigen Abschnitte des jeweiligen Segment-Reflexionsbereichs, in denen der Laserstrahl so reflektiert wird,
15 dass er durch das Fallenvolumen verläuft.

Günstig ist es, wenn das erste Segment in einem ersten Azimutalwinkel-Intervall liegt und das zweite Segment in einem zweiten Azimutalwinkel-Intervall liegt, das vom ersten Azimutalwinkel-Intervall disjunkt ist. Es ergibt sich so ein vergleichsweise einfacher Aufbau, der relativ einfach herzustellen ist.
20

Günstig ist es, wenn die Erstsegment-Reflexionsbereiche eine Erstsegment-Neigung relativ zu einer Längsachse des Fresnel-Reflektors haben und die Zweitsegment-Reflexionsbereiche eine Zweitsegment-Neigung relativ zu einer Längsachse des Fresnel-Reflektors haben, die der Erstsegment-Neigung entspricht. In anderen Worten existiert gemäß einer bevorzugten Ausführungsform eine Achse, für die diese Forderungen erfüllt sind. Diese Achse wird als Längsachse betrachtet. Günstig ist es, wenn die Längsachse senkrecht zu einer Ausgleichsebene verläuft, die durch die Reflexionsbereiche verläuft. Es ist aber auch möglich, dass die Längsachse unter einem
25 Winkel zwischen 0° und 90° zur Ausgleichsebene verläuft. Diese Längsachse entspricht beim Betrieb der Atomkühlvorrichtung vorzugsweise der Mittellinie des einfal-
30

lenden Laserstrahls. Unter dem Merkmal, dass die Zweitsegment-Neigung der Erstsegment-Neigung entspricht, wird insbesondere verstanden, dass eine Differenz zwischen Zweitsegment-Neigung und Erstsegment-Neigung höchstens 5° beträgt.

- 5 Vorzugsweise besitzt der Fresnel-Reflektor zumindest ein drittes Segment, in dem eine Mehrzahl an Drittsegment-Reflexionsbereichen angeordnet sind, wobei das dritte Segment in einem dritten Azimutalwinkel-Intervall liegt, das vom ersten Azimutalwinkel-Intervall mit dem zweiten Azimutalwinkel-Intervall disjunkt ist.
- 10 Wenn drei Segmente vorhanden sind, ergibt sich das maximale Fallenvolumen. Es ist zwar möglich, dass mehr als drei Segmente vorhanden sind, das ist aber in der Regel nicht notwendig und kann wegen des erhöhten Aufwands sogar nachteilig sein. Günstig ist es, wenn alle Reflexionsbereiche einen einfallenden Laserstrahl unter einem jeweiligen Polarwinkel reflektieren, wobei die Polarwinkel voneinander um
- 15 höchstens 10° , insbesondere höchstens 5° abweichen. Die Polarwinkel werden gemessen zur Längsachse des Fresnel-Reflektors.

Vorzugsweise sind die Reflexionsbereiche so relativ zueinander angeordnet, dass Laserstrahlen, die von den jeweiligen Reflexionsbereichen reflektiert werden, einander nicht schneiden. Beispielsweise schneiden sich keine zwei Laserstrahlen, die vom Erstsegment-Reflexionsbereich reflektiert werden. Das gleiche gilt für die übrigen Reflexionsbereiche.

20

Besitzt die Atomkühlvorrichtung genau zwei Segmente, so kann sie als 2D-Atomfalle betrieben werden. Hat die Atomkühlvorrichtung drei oder mehr Segmente, so kann sie als 3D-Atomfalle betrieben werden.

25

Vorzugsweise reflektieren die Erstsegment-Reflexionsbereiche einen einfallenden Laserstrahl unter einem ersten Polarwinkel. Die Zweitsegment-Reflexionsbereiche reflektieren den einfallenden Laserstrahl oder einen weiteren einfallenden Laserstrahl, der parallel zum ersten einfallenden Laserstrahl verläuft, unter einem zweiten Polarwinkel, der vom ersten Polarwinkel um höchstens 10° abweicht.

30

Der Azimutalwinkel und der Polarwinkel werden in einem Koordinatensystem gemessen, dessen z-Achse der Längsachse des Fresnel-Reflektors entspricht. Wird nur ein Laserstrahl zum Betrieb der Atomkühlvorrichtung verwendet, so entspricht die z-Achse vorzugsweise der Mittellinie des Laserstrahls. Werden zwei oder drei Laserstrahlen verwendet, so ist die z-Achse vorzugsweise die Gerade, die die Abstandskvadratrate zu den Mittellinien der Laserstrahlen minimiert. Je größer die Anzahl N der Segmente, desto kleiner das Fallenvolumen. Für optimale Fangbedingungen sind Neigungswinkel und Reflektivität der Reflektoroberfläche aufeinander abgestimmt.

10 Vorzugsweise verlaufen alle Reflexionsbereiche unter einem konstanten Neigungswinkel relativ zur Längsachse.

Vorzugsweise beträgt der Erstsegment-Neigungswinkel und/oder der Zweitsegment-Neigungswinkel und oder der Drittsegment-Neigungswinkel zwischen 10° und $0,5 \cdot \arccos(1/N)$. N ist dabei die Zahl der Segmente. Beispielsweise ist $N = 2, 3, 4, 5$ oder 6 . Dabei ist der maximale Neigungswinkel so gewählt, dass eine Reflektivität der Reflektoroberfläche von 100% zu optimalen Fangbedingungen führt.

Um eine möglichst gut bestimmte Reflexionsrichtung zu erreichen, ist es günstig, wenn eine Ebenheitsabweichung der Reflexionsbereiche höchstens das Zweifache der verwendeten Wellenlänge, insbesondere höchstens die Hälfte der verwendeten Wellenlänge, bevorzugt höchstens ein Viertel der verwendeten Wellenlänge, beträgt. Für sichtbares Licht entspricht das 1000 nm, insbesondere 500 nm, bevorzugt 250 nm. Alternativ oder zusätzlich ist es günstig, wenn eine Rauheit der Reflexionsbereiche höchstens ein Achtel der verwendeten Wellenlänge, insbesondere höchstens 100 nm, beträgt. Die Rauheit wird als Mittenrauwert R_a bestimmt, insbesondere nach ISO 25178. Die Ebenheitsabweichung bezieht sich auf den mittleren Abstand von der Ausgleichsebene durch den entsprechenden Reflexionsbereich.

30 Günstig ist es, wenn eine Strukturbreite der Reflexionsbereiche zumindest ein Zehnfaches der kleinsten verwendeten Wellenlänge beträgt. Alternativ oder zusätzlich kann die Strukturbreite der Reflexionsbereiche für sichtbares Licht vorzugsweise

5000 nm, insbesondere zumindest 2500 nm, betragen. Auf diese Weise werden Beugungseinflüsse weitgehend vermieden.

Um Atome auf besonders tiefe Temperaturen zu kühlen, können zwei verschiedene Wellenlängen verwendet werden. Das Laserlicht mit der ersten Wellenlänge wird von den Atomen mit besonders hoher Wahrscheinlichkeit absorbiert und re-emittiert, sodass eine hohe Kühlrate erreicht wird. Das zweite Laserlicht hingegen führt zu einer geringeren Abkühlgeschwindigkeit, jedoch zu einer tieferen erreichbaren Temperatur. Es ist daher günstig, wenn das Lasersystem zum Aussenden eines zweiten Laserstrahls ausgebildet ist, der eine zweite Wellenlänge hat, die sich von einer ersten Wellenlänge des ersten Lasers unterscheidet. Günstig ist es, dass die Verwendung des Fresnel-Reflektors dazu führt, dass für beide Wellenlängen das Fallenvolumen in guter Näherung das gleiche ist.

Günstig ist es, wenn der Fresnel-Reflektor eine Ausnehmung aufweist, durch die Atome in das Fallenvolumen geladen oder aus dem Fallenvolumen entfernt werden können. Vorzugsweise ist die Ausnehmung im Bereich um die Längsachse angeordnet. Besonders günstig ist es, wenn die Längsachse durch die Ausnehmung verläuft.

Die Erfindung löst das Problem zudem durch einen Fresnel-Reflektor mit den Merkmalen von Anspruch 9. Erfindungsgemäß ist zudem die Verwendung eines derartigen Fresnel-Reflektors für eine Atomkühlvorrichtung, insbesondere für eine Atomfalle.

Im Folgenden wird die Erfindung anhand der beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Dabei zeigt

Figur 1a einen schematischen Aufbau einer Atomkühlvorrichtung in Form einer Atomfalle,

30

Figur 1b eine perspektivische Ansicht eines erfindungsgemäßen Fresnel-Reflektors einer erfindungsgemäßen Atomkühlvorrichtung,

Figur 2a eine zweite Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Fresnel-Reflektors einer erfindungsgemäße Atomkühlvorrichtung und

5 Figur 2b eine dritte Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Fresnel-Reflektors einer erfindungsgemäßen Atomkühlvorrichtung oder Atomfalle.

Figur 1a zeigt schematisch eine erfindungsgemäße Atomkühlvorrichtung 10, die ein schematisch eingezeichnetes Lasersystem 12 zum Aussenden eines Laserstrahls 14 sowie einen Quadrupolfeld-Erzeuger 16 aufweist, der im vorliegenden Fall zwei
10 Helmholtz-Spulen 18.1, 18.2 besitzt. Werden diese gegenläufig bestromt, bildet sich ein magnetisches Quadrupolfeld, das ein Zentrum Z hat, in dem das Quadrupolfeld null ist.

Die Atomkühlvorrichtung 10 besitzt zudem einen Lichtreflektor 20 in Form eines Fresnel-Reflektors 20. Trifft der Laserstrahl 14, der sich entlang einer Längsachse L ausbreitet, auf den Fresnel-Reflektor 20, so wird er reflektiert, sodass ein reflektierter Laserstrahl 22.i entsteht ($i = 1, 2, \dots$). Der Fresnel-Reflektor 20 erstreckt sich entlang der Ebene E.

20 Die Atomkühlvorrichtung 10 gemäß Figur 1a ist eine 2D-Atomkühlvorrichtung, das heißt, dass ein Impuls eines schematisch eingezeichneten Atoms 24 in y-Richtung nicht verringert ist. In einem Fallenvolumen 26 wird der Impuls des Atoms 24 in x-Richtung und z-Richtung reduziert, sodass es sich dem Zentrum Z annähert. Das Fallenvolumen 26 ist derjenige Bereich, durch den der einfallende Laserstrahl 14 sowie, im Fall einer 2D-Atomkühlvorrichtung, zwei in unterschiedliche Richtungen reflektierte Laserstrahlen, beispielsweise 22.1, 22.2, hindurchlaufen. Für eine 3D-Atomkühlvorrichtung ist das Fallenvolumen 26 derjenige Bereich, durch den der einfallende Laserstrahl 14 sowie zumindest drei in unterschiedliche Richtungen reflektierte Laserstrahlen hindurchlaufen.

30

Der Fresnel-Reflektor 20 erstreckt sich entlang einer Ebene E, die vorzugsweise senkrecht zur Längsachse L verläuft.

Figur 1b zeigt eine schematische Ansicht des Fresnel-Reflektors 20 gemäß Figur 1a. Es ist zu erkennen, dass der Fresnel-Reflektor 20 ein erstes Segment 28.1, ein zweites Segment 28.2 aufweist. Das erste Segment besitzt eine Mehrzahl an Erstsegment-Reflexionsbereichen 30.j ($j = 1, 2, \dots$), die alle um den gleichen Erstsegment-Neigungswinkel α_1 zur Längsachse L geneigt sind.

Das zweite Segment 28.2 besitzt Zweitsegment-Reflexionsbereiche 32.k ($k = 1, 2, \dots$), die unter einem Zweitsegment-Neigungswinkel α_2 zur Längsachse L verlaufen.

Der Fresnel-Reflektor 20 kann eine Ausnehmung 34 aufweisen, durch die das Atom 24 in das Fallenvolumen 26 geladen und aus diesem wieder entfernt werden kann.

Figur 2a zeigt einen Fresnel-Reflektor 20, der ein drittes Segment 28.3 aufweist, in dem mehrere Drittsegment-Reflexionsbereiche 36.l angeordnet sind. Die Drittsegment-Reflexionsbereiche sind unter einem Drittsegment-Neigungswinkel α_3 zur Längsachse L orientiert.

Figur 2b zeigt eine weitere Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Fresnel-Reflektors 20, der ein viertes Segment 28.4 aufweist. Allgemein hat der Fresnel-Reflektor 20 Segmente 28.i mit $i = 1, \dots, N$.

Figur 2a zeigt, dass das erste Segment 28.1 in einem ersten Azimutalwinkel-Intervall A_1 liegt, für das im vorliegenden Fall $A_1 = [\varphi=0^\circ, \varphi=120^\circ[$ gilt. Das zweite Segment 28.2 liegt in einem zweiten Azimutalwinkel-Intervall $A_2 = [120^\circ, 240^\circ[$, das vom ersten Azimutalwinkel-Intervall disjunkt ist. Das dritte Segment 28.3 liegt in einem dritten Azimutalwinkel-Intervall $A_3 = [240^\circ, 0^\circ[$, das vom ersten Azimutalwinkel-Intervall A_1 und zweiten Azimutalwinkel-Intervall A_2 disjunkt ist.

Figur 1a zeigt, dass die Erstsegment-Reflexionsbereiche 30 den einfallenden Laserstrahl 14 unter einem ersten Polarwinkel θ_1 reflektieren. Die Zweitsegment-Reflexionsbereiche 32 reflektieren den einfallenden Laserstrahl 14 unter einem zweiten Polarwinkel θ_2 , der vom ersten Polarwinkel θ_1 um höchstens 10° abweicht. Der Azi-

mutalwinkel φ und die Polarwinkel θ werden im Koordinatensystem gemessen, dessen z-Achse in der Mittellinie des Laserstrahls 14 verläuft. Im vorliegenden Fall hat der Laserstrahl 14 einen so großen Durchmesser, dass alle Segmente 28.i beleuchtet werden.

Bezugszeichenliste

10	Atomkühlvorrichtung
12	Lasersystem
14	Laserstrahl
16	Quadrupolfeld-Erzeuger
18	Helmholtz-Spulen
20	Fresnel-Reflektor
22	reflektierter Laserstrahl
24	Atom
26	Fallenvolumen
28	Segment
30	Erstsegment-Reflexionsbereich
32	Zweitsegment-Reflexionsbereich
34	Ausnehmung
36	Drittsegment-Reflexionsbereich
E	Ebene
L	Längsachse
N	Zahl der Segmente
Z	Zentrum
i, j, k	Laufindices
α_1	Erstsegment-Neigungswinkel
α_2	Zweitsegment-Neigungswinkel
α_3	Drittsegment-Neigungswinkel

Patentansprüche:

1. Atomkühlvorrichtung (10), insbesondere Atomfalle, mit
 - (a) einem Lasersystem (12) zum Aussenden eines Laserstrahls (14),
 - (b) einem magnetischen Quadrupolfeld-Erzeuger (16) und
 - (c) einem Lichtreflektor, der angeordnet ist zum Reflektieren des Laserstrahls
5 (14), sodass sich ein Fallenvolumen (26) bildet,
dadurch gekennzeichnet, dass
 - (d) der Lichtreflektor ein Fresnel-Reflektor (20) ist.

2. Atomkühlvorrichtung (10) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass
 - 10 (a) der Fresnel-Reflektor (20) das Folgende aufweist:
 - (i) ein erstes Segment (28.1), in dem eine Mehrzahl an Erstsegment-
Reflexionsbereichen (30) angeordnet sind, und
 - (ii) ein zweites Segment (28.2), in dem eine Mehrzahl an Zweitsegment-
Reflexionsbereichen (32) angeordnet sind,
 - 15 (b) das erste Segment (28.1) in einem ersten Azimutalwinkel-Intervall (A_1)
liegt,
 - (c) das zweite Segment (28.2) in einem zweiten Azimutalwinkel-Intervall (A_2)
liegt, das vom ersten Azimutalwinkel-Intervall disjunkt ist,
 - (d) die Erstsegment-Reflexionsbereiche (30) eine Erstsegment-Neigung (α_1)
20 relativ zu einer Längsachse (L) des Fresnel-Reflektors (20) haben und
 - (e) die Zweitsegment-Reflexionsbereiche (32) eine Zweitsegment-Neigung
(α_2) relativ zu einer Längsachse (L) des Fresnel-Reflektors (20) haben, die
der Erstsegment-Neigung (α_1) entspricht.

3. Atomkühlvorrichtung (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass
- (a) der Fresnel-Reflektor (20) ein drittes Segment (28.3), in dem eine Mehrzahl an Drittsegment-Reflexionsbereichen (36) angeordnet sind, aufweist,
 - 5 (b) das dritte Segment (28.3) in einem dritten Azimutalwinkel-Intervall (A_3) liegt, das vom ersten Azimutalwinkel-Intervall (A_1) und vom zweiten Azimutalwinkel-Intervall (A_2) disjunkt ist,
 - (c) die Drittsegment-Reflexionsbereiche (36) einen einfallenden Laserstrahl (14) unter einem dritten Polarwinkel reflektieren, der vom ersten Polarwinkel um höchstens 5° abweicht.
- 10
4. Atomkühlvorrichtung (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Reflexionsbereiche so relativ zueinander angeordnet sind, dass Laserstrahlen, die von den jeweiligen Reflexionsbereichen reflektiert werden, einander nicht schneiden.
- 15
5. Atomkühlvorrichtung (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass
- (a) alle Erstsegment-Reflexionsbereiche (30) unter einem konstanten Erstsegment-Neigungswinkel (α_1) verlaufen und/oder
 - 20 (b) alle Zweitsegment-Reflexionsbereiche (32) unter einem konstanten Zweitsegment-Neigungswinkel (α_2) verlaufen und/oder
 - (c) alle Drittsegment-Reflexionsbereiche (36) unter einem konstanten Drittsegment-Neigungswinkel (α_3) verlaufen.
- 25
6. Atomkühlvorrichtung (10) nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass der Erstsegment-Neigungswinkel (α_1) und/oder der Zweitsegment-Neigungswinkel (α_2) und/oder der Drittsegment-Neigungswinkel (α_3) zwischen 10° und $0,5 \cdot \arccos(1/N)$ beträgt, wobei N die Zahl der Segmente (28) ist.
- 30
7. Atomkühlvorrichtung (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass
- (a) eine Ebenheitsabweichung der Reflexionsbereiche höchstens 2000 nm, insbesondere höchstens 1000 nm, beträgt und/oder

- (b) eine Rauheit (Ra) der Reflexionsbereiche höchstens 100 nm, insbesondere höchstens 50 nm, beträgt.
8. Atomkühlvorrichtung (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine Strukturbreite der Reflexionsbereiche zumindest ein Zehnfaches der kleinsten verwendeten Wellenlänge beträgt.
9. Atomkühlvorrichtung (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass
- (a) das Lasersystem (12) zum Aussenden zumindest eines zweiten Laserstrahls (14.2) ausgebildet ist,
- (b) der zumindest eine zweite Laserstrahl (14.2) eine zweite Wellenlänge hat, die sich von einer ersten Wellenlänge des ersten Laserstrahls (14.1) unterscheidet.
10. Atomkühlvorrichtung (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine Ausnehmung im Fresnel-Reflektor (20), die um die Längsachse (L) angeordnet ist.
11. Fresnel-Reflektor (20), der ausgebildet ist zur Verwendung in einer Atomkühlvorrichtung (10) nach einem der obenstehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch
- (a) ein erstes Segment (28.1), in dem eine Mehrzahl an Erstsegment-Reflexionsbereichen (30) angeordnet sind, und
- (b) ein zweites Segment (28.2), in dem eine Mehrzahl an Zweitsegment-Reflexionsbereichen (32) angeordnet sind,
- (c) zumindest ein drittes Segment (28.3), in dem eine Mehrzahl an Drittsegment-Reflexionsbereichen (36) angeordnet sind,
- (d) wobei das erste Segment (28.1) in einem ersten Azimutalwinkel-Intervall liegt,
- (e) wobei das zweite Segment (28.2) in einem zweiten Azimutalwinkel-Intervall liegt, das vom ersten Azimutalwinkel-Intervall disjunkt ist,

- (f) wobei das dritte Segment (28.3) in einem dritten Azimutalwinkel-Intervall liegt, das vom ersten Azimutalwinkel-Intervall und vom zweiten Azimutalwinkel-Intervall disjunkt ist,
- (g) die Erstsegment-Reflexionsbereiche (30) eine Erstsegment-Neigung relativ zu einer Längsachse (L) des Fresnel-Reflektors (20) haben,
- 5 (h) die Zweitsegment-Reflexionsbereiche (32) eine Zweitsegment-Neigung relativ zu einer Längsachse (L) des Fresnel-Reflektors (20) haben, die der Erstsegment-Neigung entspricht,
- (i) die Drittsegment-Reflexionsbereiche (36) eine Drittsegment-Neigung relativ zu einer Längsachse (L) des Fresnel-Reflektors (20) haben, die der
- 10 Erstsegment-Neigung entspricht und
- (j) wobei der Erstsegment-Neigungswinkel (α_1) und/oder der Zweitsegment-Neigungswinkel (α_2) und/oder der Drittsegment-Neigungswinkel (α_3) zwischen 10° und $0,5 \cdot \arccos(1/N)$ beträgt, wobei N die Zahl der Segmente
- 15 (28) ist.
12. Verfahren zum Kühlen oder Einfangen von Atomen (24), gekennzeichnet durch die Schritte:
- (a) Leiten zumindest eines Laserstrahls (14) auf einen Fresnel-Reflektor (20)
- 20 nach Anspruch 11, sodass an jedem Reflexionsbereich reflektierte Laserstrahlen entstehen,
- (b) wobei der zumindest eine Laserstrahl (14) so auf den Fresnel-Reflektor (20) geleitet wird, dass ein Fallenvolumen (26) entsteht, wobei das Fallenvolumen derjenige Raumbereich ist, für den gilt, dass durch ihn reflektierte
- 25 Laserstrahlen (22) aller Segmente (28.1, 28.2, 28.3) verlaufen, und
- (c) Laden zumindest eines Atoms (24) in das Fallenvolumen (26), wobei eine Wellenlänge des zumindest einen Laserstrahls (14) so gewählt ist, dass das zumindest eine Atom (24) durch den Laserstrahl und die reflektierten Laserstrahlen gekühlt wird.

1/2

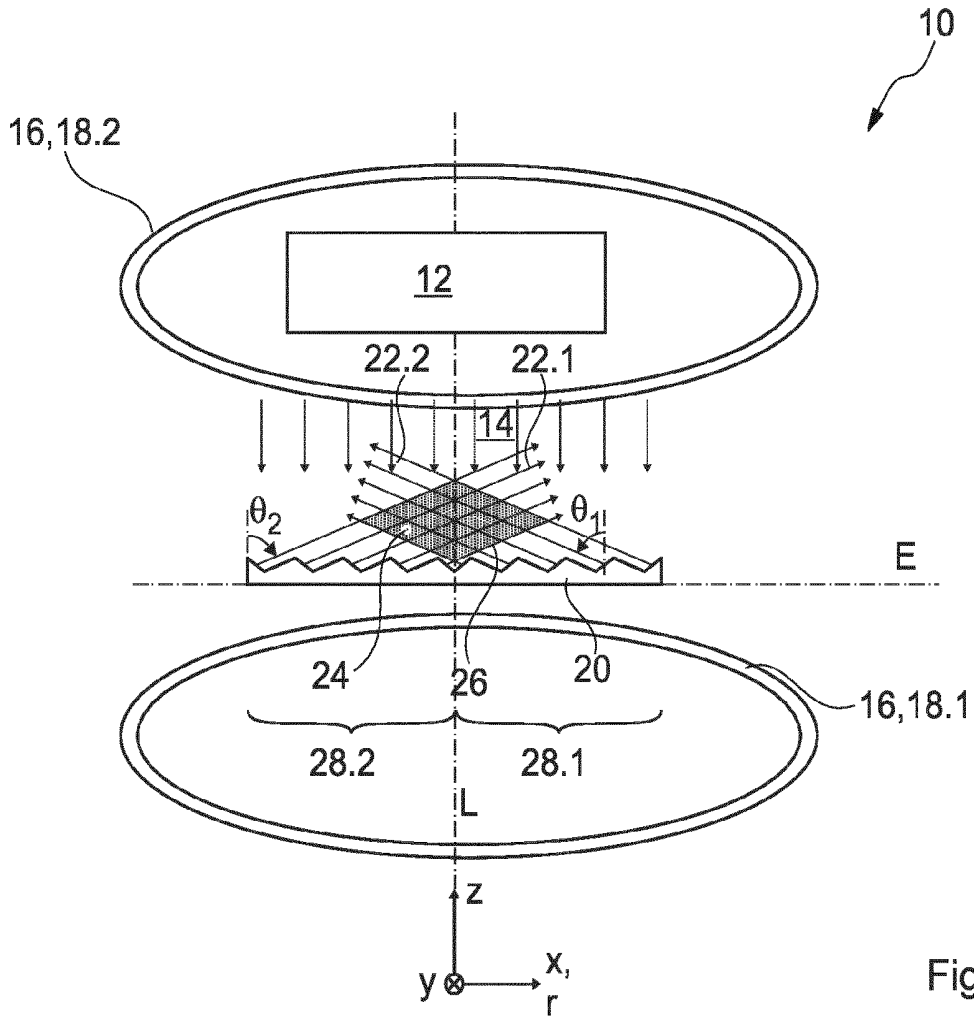


Fig. 1a

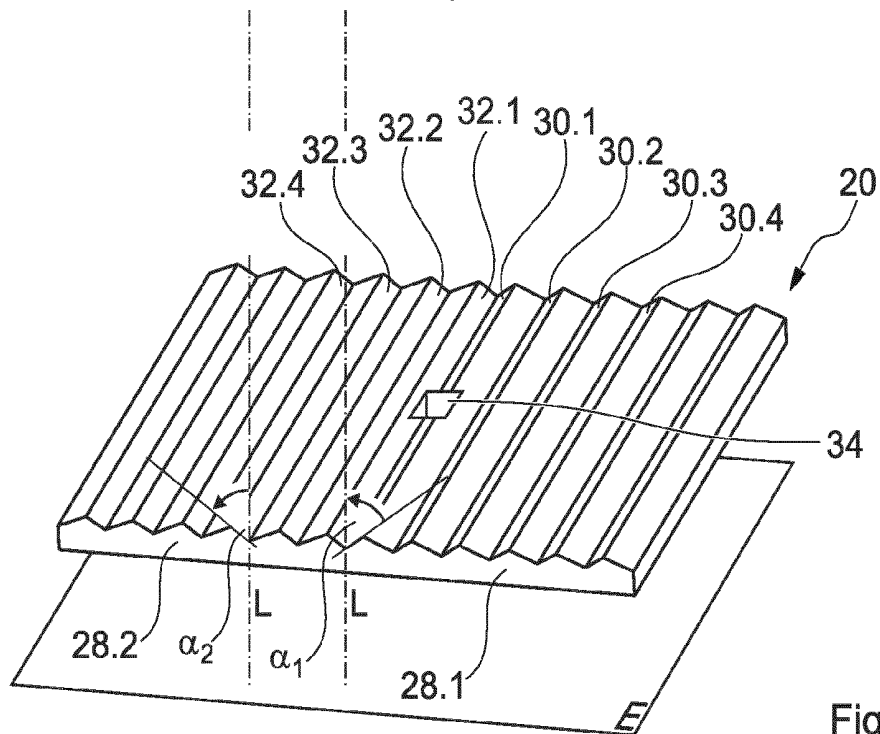
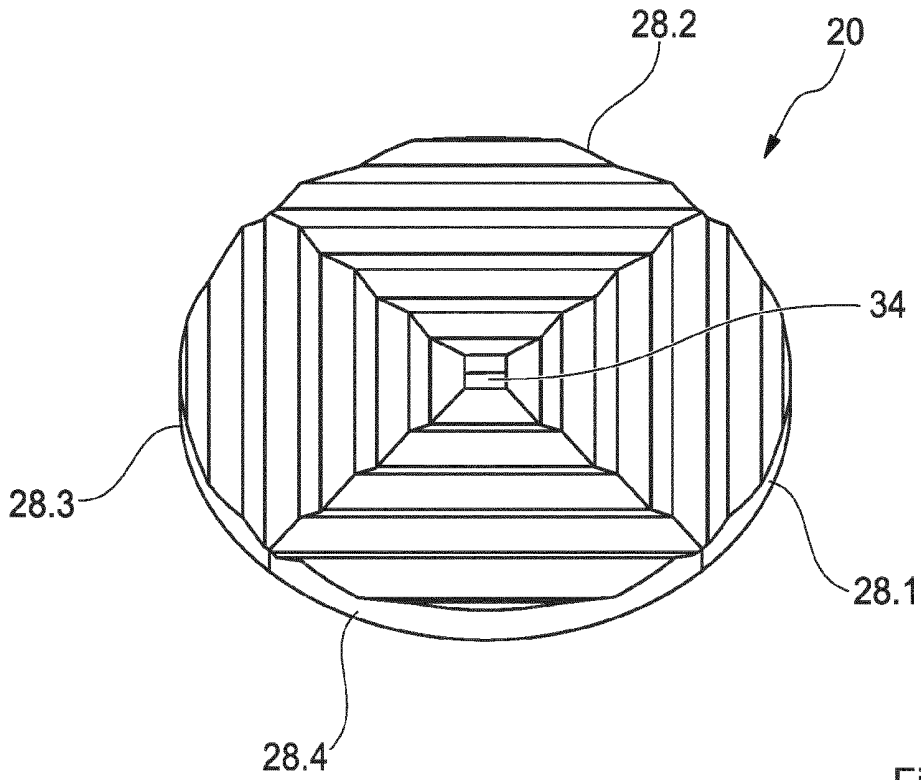
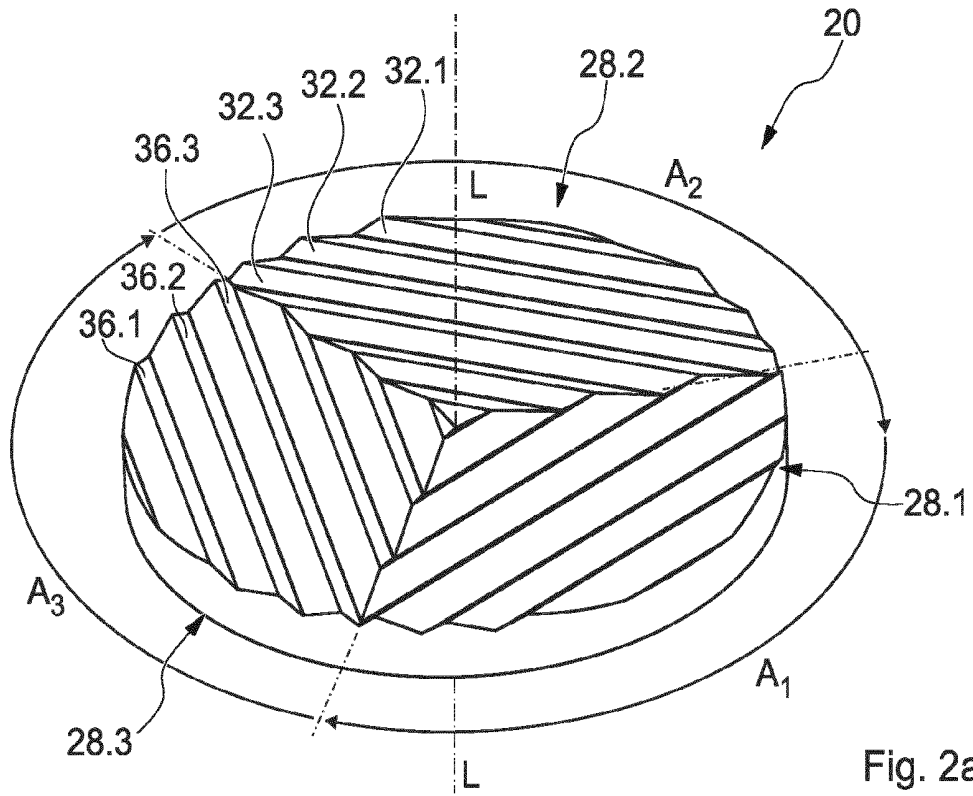


Fig. 1b

2/2



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2020/086036

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER <i>G02B 5/09</i> (2006.01); <i>G04F 5/14</i> (2006.01)i		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G02B; G04G; G04F		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EPO-Internal		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	NSHII C. C. ET AL. "A surface-patterned chip as a strong source of ultracold atoms for quantum technologies" <i>NATURE NANOTECHNOLOGY</i> , London, Vol. 8, No. 5, 07 April 2013 (2013-04-07), pages 321-324, Retrieved from the Internet: http://www.nature.com/articles/nnano.2013.47 [retrieved on 2021-02-24] DOI: 10.1038/nnano.2013.47 ISSN: 1748-3387, XP055779452 cited in the application the whole document	1-12
A	MATTHIEU VANGELEYN ET AL. "Single-laser, one beam, tetrahedral magneto-optical trap" <i>ARXIV.ORG, CORNELL UNIVERSITY LIBRARY, 201 OLIN LIBRARY CORNELL UNIVERSITY ITHACA, NY 14853</i> , 18 May 2009 (2009-05-18), DOI: 10.1364/OE.17.013601 XP080324895 figures 1, 5	1-12
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 26 February 2021		Date of mailing of the international search report 09 March 2021
Name and mailing address of the ISA/EP European Patent Office p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk Netherlands Telephone No. (+31-70)340-2040 Facsimile No. (+31-70)340-3016		Authorized officer Zwerger, Markus Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2020/086036**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	ARLT J J ET AL. "A pyramidal magneto-optical trap as a source of slow atoms" <i>OPTICS COMMUNICATIONS, ELSEVIER, AMSTERDAM, NL</i> , Vol. 157, No. 1-6, 01 December 1998 (1998-12-01), pages 303-309 DOI: 10.1016/S0030-4018(98)00499-4 ISSN: 0030-4018, XP004150736 figures 2, 3	1-12
<hr/>		

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES INV. G02B5/09 G04F5/14 ADD.		
Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC		
B. RECHERCHIERTE GEBIETE		
Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole) G02B G04G G04F		
Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen		
Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe) EPO-Internal		
C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	NSHII C. C. ET AL: "A surface-patterned chip as a strong source of ultracold atoms for quantum technologies", NATURE NANOTECHNOLOGY, [Online] Bd. 8, Nr. 5, 7. April 2013 (2013-04-07), Seiten 321-324, XP055779452, London ISSN: 1748-3387, DOI: 10.1038/nano.2013.47 Gefunden im Internet: URL: http://www.nature.com/articles/nano.2013.47 [gefunden am 2021-02-24] in der Anmeldung erwähnt das ganze Dokument ----- -/-	1-12
<input checked="" type="checkbox"/> Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen <input type="checkbox"/> Siehe Anhang Patentfamilie		
* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen : "A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist "E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist "L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt) "O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht "P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist "T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist "X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden "Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist "&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist		
Datum des Abschlusses der internationalen Recherche		Absenddatum des internationalen Recherchenberichts
26. Februar 2021		09/03/2021
Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Bevollmächtigter Bediensteter Zwenger, Markus

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	<p>MATTHIEU VANGELEYN ET AL: "Single-laser, one beam, tetrahedral magneto-optical trap", ARXIV.ORG, CORNELL UNIVERSITY LIBRARY, 201 OLIN LIBRARY CORNELL UNIVERSITY ITHACA, NY 14853, 18. Mai 2009 (2009-05-18), XP080324895, DOI: 10.1364/OE.17.013601 Abbildungen 1, 5</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-12
A	<p>ARLT J J ET AL: "A pyramidal magneto-optical trap as a source of slow atoms", OPTICS COMMUNICATIONS, ELSEVIER, AMSTERDAM, NL, Bd. 157, Nr. 1-6, 1. Dezember 1998 (1998-12-01), Seiten 303-309, XP004150736, ISSN: 0030-4018, DOI: 10.1016/S0030-4018(98)00499-4 Abbildungen 2, 3</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-12