



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2020 102 222.0**
(22) Anmeldetag: **30.01.2020**
(43) Offenlegungstag: **05.08.2021**

(51) Int Cl.: **F21V 7/04** (2006.01)
G21K 1/06 (2006.01)
G21K 1/093 (2006.01)

(71) Anmelder:
**Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie,
dieses vertreten durch den Präsidenten der
Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, 38116
Braunschweig, DE**

(74) Vertreter:
**Gramm, Lins & Partner Patent- und
Rechtsanwälte PartGmbB, 38122 Braunschweig,
DE**

(72) Erfinder:
**Lisdat, Christian, Dr., 30459 Hannover, DE;
Leopold, Tobias, Dr., 30167 Hannover, DE;
Bondza, Saskia, 30161 Hannover, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

GB 2 558 574 A
US 2017 / 0 359 888 A1

**C.C. Nshii, et al. "A surface-patterned chip as
a strong source of ultracold atoms for quantum
technologies." Nature nanotechnology, 2013, 8.
Jg., Nr. 5, S. 321 – 324**

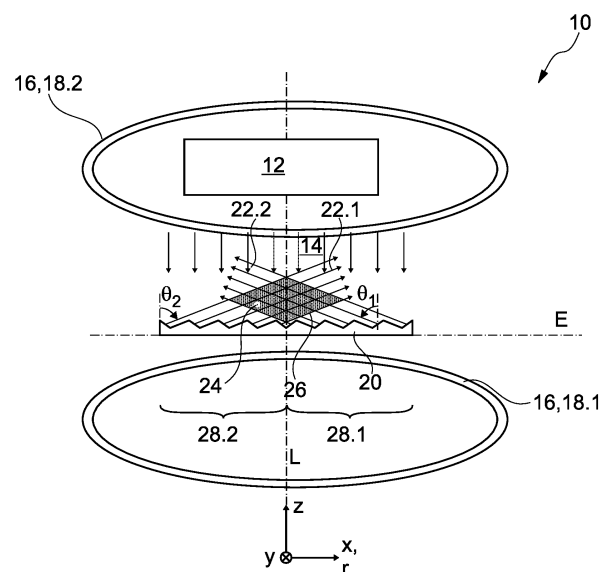
**M. Vangeleyn, et al. "Laser cooling with a
single laser beam and a planar diffractor." Optics
letters 35.20, 2010, S. 3453 – 3455**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Atomkühlvorrichtung, insbesondere Atomfalle, und Verfahren zum Kühlen oder Einfangen von Atomen**

(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.



Beschreibung

[0001] 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.

[0002] Atomkühlvorrichtungen, insbesondere Atomfallen, werden verwendet, um eine vergleichsweise geringe Anzahl an Atomen, in der Regel einige wenige Millionen Atome, so stark abzubremesen 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.

[0003] Um die Eigenschaften der Atome im Fallenvolumen messen zu können, muss das 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.

[0004] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, Nachteile im Stand der Technik zu vermindern.

[0005] Die Erfindung löst das Problem durch eine gattungsgemäße Atomkühlvorrichtung, insbesondere Atomfalle, bei welcher der Lichtreflektor ein Fresnel-Reflektor ist.

[0006] 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, 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 zumindest einen Laserstrahls so gewählt ist, dass das zumindest ei-

ne 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.

[0007] 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.

[0008] 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.

[0009] 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.

[0010] Unter dem Lichtreflektor wird insbesondere ein Bauteil verstanden, das Laserstrahlen nicht-diffus reflektiert.

[0011] 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.

[0012] Der Fresnel-Reflektor ist, insbesondere wenn er aus Metall aufgebaut ist, vorzugsweise durch Spa-

nen 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.

[0013] 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, dass er durch das Fallenvolumen verläuft.

[0014] 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.

[0015] 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 Winkel zwischen 0° und 90° zur Ausgleichsebene verläuft. Diese Längsachse entspricht beim Betrieb der Atomkühlvorrichtung vorzugsweise der Mittellinie des einfallenden 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.

[0016] 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.

[0017] 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 höchstens 10° , insbesondere höchstens 5° abweichen. Die Polarwinkel werden gemessen zur Längsachse des Fresnel-Reflektors.

[0018] 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.

[0019] 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.

[0020] 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.

[0021] 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 Abstandsquadrate 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.

[0022] Vorzugsweise verlaufen alle Reflexionsbereiche unter einem konstanten Neigungswinkel relativ zur Längsachse.

[0023] 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.

[0024] 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.

[0025] 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.

[0026] 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.

[0027] 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.

[0028] 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.

[0029] Im Folgenden wird die Erfindung anhand der beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Dabei zeigt

Fig. 1a einen schematischen Aufbau einer Atomkühlvorrichtung in Form einer Atomfalle,

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

Fig. 2a eine zweite Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Fresnel-Reflektors einer erfindungsgemäßen Atomkühlvorrichtung und

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

[0030] **Fig. 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 Helmholtz-Spulen **18**, **18.2** besitzt. Werden diese gegenläufig bestromt, bildet sich ein magnetisches Quadrupolfeld, das ein Zentrum **Z** hat, in dem das Quadrupolfeld null ist.

[0031] 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**.

[0032] Die Atomkühlvorrichtung **10** gemäß **Fig. 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.

[0033] Der Fresnel-Reflektor **20** erstreckt sich entlang einer Ebene **E**, die vorzugsweise senkrecht zur Längsachse **L** verläuft.

[0034] **Fig. 1b** zeigt eine schematische Ansicht des Fresnel-Reflektors **20** gemäß **Fig. 1a**. Es ist zu erkennen, dass der Fresnel-Reflektor **20** ein erstes Segment **28**, ein zweites Segment **28** aufweist. Das ers-

te Segment besitzt eine Mehrzahl an Erstsegment-Reflexionsbereichen 30.j (j= 1, 2, ...), die alle um den gleichen Erstsegment-Neigungswinkel α_1 zur Längsachse **L** geneigt sind.

[0035] Das zweite Segment 28 besitzt Zweitsegment-Reflexionsbereiche 32.k (k= 1, 2, ...), die unter einem Zweitsegment-Neigungswinkel α_2 zur Längsachse **L** verlaufen.

[0036] 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.

[0037] Fig. 2a zeigt einen Fresnel-Reflektor 20, der ein drittes Segment 28 aufweist, in dem mehrere Drittsegment-Reflexionsbereiche 36 angeordnet sind. Die Drittsegment-Reflexionsbereiche sind unter einem Drittsegment-Neigungswinkel α_3 zur Längsachse **L** orientiert.

[0038] Fig. 2b zeigt eine weitere Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Fresnel-Reflektors 20, der ein viertes Segment 28 aufweist. Allgemein hat der Fresnel-Reflektor 20 Segmente 28.i mit i = 1, ..., N.

[0039] Fig. 2a zeigt, dass das erste Segment 28 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 liegt in einem zweiten Azimutalwinkel-Intervall $A_2 = [120^\circ, 240^\circ]$, das vom ersten Azimutalwinkel-Intervall disjunkt ist. Das dritte Segment 28 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.

[0040] Fig. 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 Azimutalwinkel 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	Laufindizes
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 (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
 - (a) der Fresnel-Reflektor (20)
 - (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,
 - (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) 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,
- (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.

4. 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
- (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.

5. Atomkühlvorrichtung (10) nach Anspruch 4, **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.

6. 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 (R_a) der Reflexionsbereiche höchstens 100 nm, insbesondere höchstens 50 nm, beträgt.

7. 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.

8. Atomkühlvorrichtung (10) nach einem der vorstehenden Ansprüche, **gekennzeichnet durch** eine Ausnehmung im Fresnel-Reflektor (20), die um die Längsachse (L) angeordnet ist.

9. Fresnel-Reflektor (20), **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,
- (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 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 (28) ist.

10. Verfahren zum Kühlen oder Einfangen von Atomen (24), **gekennzeichnet durch** die Schritte:

- (a) Leiten zumindest eines Laserstrahls (14) auf einen Fresnel-Reflektor (20) nach Anspruch 9, 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 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.

Es folgen 2 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

