

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5475491号
(P5475491)

(45) 発行日 平成26年4月16日 (2014. 4. 16)

(24) 登録日 平成26年2月14日 (2014. 2. 14)

(51) Int. Cl.

F I

H O 1 L 39/00 (2006.01)
B 8 2 B 3/00 (2006.01)H O 1 L 39/00 Z A A G
B 8 2 B 3/00

請求項の数 2 (全 9 頁)

(21) 出願番号 特願2010-27350 (P2010-27350)
 (22) 出願日 平成22年2月10日 (2010. 2. 10)
 (65) 公開番号 特開2011-165918 (P2011-165918A)
 (43) 公開日 平成23年8月25日 (2011. 8. 25)
 審査請求日 平成24年2月10日 (2012. 2. 10)

(73) 特許権者 000004226
 日本電信電話株式会社
 東京都千代田区大手町一丁目5番1号
 (74) 代理人 100064621
 弁理士 山川 政樹
 (74) 代理人 100098394
 弁理士 山川 茂樹
 (74) 代理人 100153006
 弁理士 小池 勇三
 (72) 発明者 向井 哲哉
 東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日
 本電信電話株式会社内

審査官 空 哲次

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 原子捕捉装置および原子捕捉方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

超伝導材料から構成されて貫通孔を有する捕捉部と、
 この捕捉部を超伝導転移温度以下に冷却する冷却手段と、
 前記捕捉部に均一な第1磁場を印加する磁場印加手段と、
前記捕捉部の近傍に捕捉対象の原子を供給する原子供給手段と
を少なくとも備え、
前記磁場印加手段は、前記捕捉部の貫通孔を貫く前記第1磁場を印加し、
前記磁場印加手段は、前記第1磁場に加え、前記第1磁場とは逆向きの均一な第2磁場
を前記捕捉部に印加し、
前記磁場印加手段は、前記捕捉部の貫通孔を貫く前記第2磁場を印加し、
前記第1磁場は、前記第2磁場が印加されて前記冷却手段により前記捕捉部が超伝導転
移温度以下に冷却され、前記第2磁場の印加が停止されてから前記原子供給手段により前
記原子が前記捕捉部の近傍に供給された後で、印加されるものであり、
前記第2磁場は、前記第2磁場の印加が停止された後に、前記捕捉部近傍に不均一な磁
場を形成するための永久電流を流すための磁場であり、
前記第1磁場は、前記永久電流による不均一な磁場と作用することで、前記第1磁場
の印加により前記捕捉部近傍に不均一な反転磁場を形成するための磁場である
 ことを特徴とする原子捕捉装置。

【請求項 2】

10

20

超伝導材料から構成されて貫通孔を有する捕捉部に、前記貫通孔を貫く第2磁場を印加する第1ステップと、

前記捕捉部を超伝導転移温度以下に冷却する第2ステップと、

前記捕捉部が超伝導転移温度以下に冷却された状態で前記第2磁場の印加を停止する第3ステップと、

前記捕捉部が超伝導転移温度以下に冷却された状態で前記捕捉部の近傍に捕捉対象の原子を供給する第4ステップと、

前記捕捉部が超伝導転移温度以下に冷却された状態で、前記貫通孔を貫き、前記第2磁場とは逆向きの均一な第1磁場を、前記捕捉部に印加する第5ステップと

を備え、

前記第2磁場は、前記第3ステップの後に、前記捕捉部近傍に不均一な磁場を形成するための永久電流を流すための磁場であり、

前記第1磁場は、前記永久電流による不均一な磁場と作用することで、前記第5ステップの後に、前記捕捉部近傍に不均一な反転磁場を形成するための磁場である

ことを特徴とする原子捕捉方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、原子干渉計、原子および超伝導固体素子の量子状態の変換、および記憶・制御手段としての応用が可能となる、中性原子を捕捉する原子捕捉装置および原子捕捉方法に関するものである。

【背景技術】

【0002】

中性原子は、内部状態を持つ複合粒子であり、電磁場を用いて内部状態を量子力学的に操作することが、比較的容易にできる。従って、将来の量子デバイスの材料として有力な候補となっているが、室温の原子は、時速千キロメートル程度で運動する非常に小さい粒子のため、この原子を冷却して限られた空間内に閉じ込める原子捕捉の技術が重要となっている。

【0003】

ここで、磁気モーメントがゼロでない原子は、磁場の勾配から力を受ける。従って、磁場の強いところでエネルギーが高くなる状態の原子（中性原子）は、3次元的な極小点を持つ不均一磁場中に置くことで、空間的に閉じ込めることができる。例えば、固体の表面に微細な配線パターンを形成し、この配線を通る電流の周りに発生する磁場により、原子を捕捉するマイクロ磁場トラップの技術が開発され、原子の捕捉を実現している（非特許文献1参照）。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特開2008-173745号公報

【非特許文献】

【0005】

【非特許文献1】R. Folman, et al. "MICROSCOPIC ATOM OPTICS: FROM WIRES TO AN ATOM CHIP", Advance in Atomic, Molecular, and Optical Physics, Vol.48, pp.263-356, 2002.

【非特許文献2】T.Mukai, et al., "Persistent Supercurrent Atom Chip", PHYSICAL REVIEW LETTERS 98,260407, pp.260407-1-260407-4, 2007.

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

しかしながら、上述したマイクロ磁場トラップでは、電流を駆動するための構造が必要

10

20

30

40

50

となり、設計上の制約の1つとなっている（特許文献1，非特許文献2参照）。

【0007】

本発明は、以上のような問題点を解消するためになされたものであり、電流を駆動するための構造を用いることなしに、原子の閉じ込めが行えるようにすることを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0008】

本発明に係る原子捕捉装置は、超伝導材料から構成されて貫通孔を有する捕捉部と、この捕捉部を超伝導転移温度以下に冷却する冷却手段と、捕捉部に均一な第1磁場を印加する磁場印加手段とを少なくとも備える。ここで、磁場印加手段は、捕捉部の貫通孔を貫く第1磁場を印加する。

10

【0009】

上記原子捕捉装置において、磁場印加手段は、第1磁場に加え、第1磁場とは逆向きの均一な第2磁場を捕捉部に印加する。磁場印加手段は、捕捉部の貫通孔を貫く第2磁場を印加する。

【0010】

上記原子捕捉装置において、捕捉部の近傍に捕捉対象の原子を供給する原子供給手段を備える。上記原子捕捉装置において、第1磁場は、第2磁場が印加されて冷却手段により捕捉部が超伝導転移温度以下に冷却され、第2磁場の印加が停止してから原子供給手段により原子が捕捉部の近傍に供給された後で、印加されるものである。また、第2磁場は、第2磁場の印加が停止された後に、捕捉部近傍に不均一な磁場を形成するための永久電流を流すための磁場であり、第1磁場は、永久電流による不均一な磁場と作用することで、第1磁場の印加により捕捉部近傍に不均一反転磁場を形成するための磁場である。

20

【0011】

また、本発明に係る原子捕捉方法は、超伝導材料から構成されて貫通孔を有する捕捉部に、貫通孔を貫く第2磁場を印加する第1ステップと、捕捉部を超伝導転移温度以下に冷却する第2ステップと、捕捉部が超伝導転移温度以下に冷却された状態で第2磁場の印加を停止する第3ステップと、捕捉部が超伝導転移温度以下に冷却された状態で捕捉部の近傍に捕捉対象の原子を供給する第4ステップと、捕捉部が超伝導転移温度以下に冷却された状態で、貫通孔を貫き、第2磁場とは逆向きの均一な第1磁場を、捕捉部に印加する第5ステップとを備える。

30

【0012】

上記原子捕捉方法において、第2磁場は、第3ステップの後に、捕捉部近傍に不均一な磁場を形成するための永久電流を流すための磁場であり、第1磁場は、永久電流による不均一な磁場と作用することで、第5ステップの後に、捕捉部近傍に不均一反転磁場を形成するための磁場である。

【発明の効果】

【0013】

以上説明したように、本発明によれば、超伝導材料から構成されて貫通孔を有する捕捉部を超伝導転移温度以下に冷却し、この捕捉部の近傍に捕捉対象の原子を供給し、捕捉部に均一な第1磁場を印加するようにしたので、電流を駆動するための構造を用いることなしに、原子の閉じ込めが行えるようになるという優れた効果が得られる。

40

【図面の簡単な説明】

【0014】

【図1A】本発明の実施の形態における原子捕捉装置の構成を示す構成図である。

【図1B】本発明の実施の形態における原子捕捉装置の構成を示す構成図である。

【図1C】本発明の実施の形態における原子捕捉装置の一部構成を示す平面図である。

【図2】本発明の実施の形態における原子捕捉装置の一部構成を拡大して示す断面図である。

【図3】本発明の実施の形態における原子捕捉装置の構成を示す構成図である。

【図4】本発明の実施の形態における原子捕捉方法を説明するためのフローチャートであ

50

る。

【図5】冷却部102に冷却される捕捉部101近傍に形成される不均一磁場の状態を示す断面図である。

【図6】冷却部102に冷却される捕捉部101近傍に形成される不均一磁場の状態を示す断面図である。

【図7】本発明の実施の形態における他の原子捕捉装置の一部構成を示す平面図である。

【図8】本発明の実施の形態における他の原子捕捉装置の一部構成を示す平面図である。

【発明を実施するための形態】

【0015】

以下、本発明の実施の形態について図を参照して説明する。図1A、図1B、図1Cは、本発明の実施の形態における原子捕捉装置の構成を示す構成図および平面図である。この原子捕捉装置は、超伝導材料から構成されて貫通孔101aを有する捕捉部101と、捕捉部101を超伝導転移温度以下に冷却する冷却部102と、捕捉部101に均一な第1磁場131および第1磁場131とは逆向きの均一な第2磁場132を印加する磁場印加部103とを備える。

【0016】

捕捉部101は、図1Cの平面図に例示するように、リング状に形成されて貫通孔101aを備える。捕捉部101は、例えば、厚さ1 μ m、外径1mm、内径0.9mmの閉ループ形状であればよい。また、捕捉部101の外形は、円形状および楕円形状であればよく、また、多角形状であってもよい。捕捉部101を構成する超伝導材料としては、ニオブ(Nb)、窒化ニオブ(NbN)、ホウ化マグネシウム(MgB₂)、アルミニウム(Al)、および、鉛(Pb)など、超伝導性を有するものを用いることができる。

【0017】

捕捉部101は、例えば、図2の断面図に示すように、酸化シリコンやコランダム(サファイア)などの絶縁性の材料からなる基板201の上に形成することで、他の構成に対し、超伝導電流に関して絶縁分離された状態とする。例えば、基板201の上に、スパッタ法や蒸着法などにより上述した超伝導材料の膜を形成することで、捕捉部101を形成することができる。このように構成した場合、冷却部102による捕捉部101の冷却は、基板201を介して行えばよい。また、基板201は、超伝導性を示さない金属材料から構成することも考えられる。

【0018】

また、捕捉部101により原子を捕捉するためには、対象となる原子を捕捉部101の近傍にまで供給することになる。例えば図3に示すように、磁気光学トラップ301により予め室温(20程度)から予備冷却(数百マイクロケルビン程度)した原子を、四重極磁場トラップ302中に保持し、四重極磁場トラップ302を移動させることで、保持した原子を捕捉部101の近傍にまで供給すればよい。なお、これらのことは、真空中で行う。

【0019】

次に、原子捕捉装置による原子捕捉方法について、図4のフローチャートを用いて説明する。まず、磁場印加部103を動作させ、例えば、捕捉部101より磁場印加部103の方向に向かう均一な第2磁場132を、捕捉部101に印加する(ステップS401)。第2磁場132の印加は、捕捉部101の貫通孔101aを貫く方向に印加する。この磁場印加を開始したら、冷却部102を動作させて捕捉部101の冷却を開始する(ステップS402)。この冷却により、捕捉部101を超伝導転移温度以下に冷却したら(ステップS403)、第2磁場132の印加を遮断(停止)する(ステップS404)。

【0020】

第2磁場132の印加遮断に引き続き、捕捉部101の近傍に捕捉対象の原子を供給する(ステップS405)。例えば、捕捉部101が配置されている真空中で、原子を捕捉している四重極磁場トラップ302を、捕捉部101の中央部下部に移動させ、四重極磁場トラップ302の電流を遮断して四重極磁場トラップ302の閉じ込めポテンシャルを

10

20

30

40

50

消去することで、原子の供給を行う。この後、磁場印加部 103 により捕捉部 101 に第 2 磁場 132 とは逆向きの均一な第 1 磁場 131 を印加する（ステップ S406）。第 1 磁場 131 も、捕捉部 101 の貫通孔 101a を貫く方向に印加する。なお、四重極磁場トラップ 302 の電流を遮断すると同時に、第 1 磁場 131 の印加を開始する。

【0021】

第 1 磁場 131 の印加により、供給された原子が捕捉部 101 の近傍に捕捉されるようになる。第 1 磁場 131 を印加し続けられれば、原子の捕捉も継続される。また、第 1 磁場 131 の印加を遮断（停止）すれば、捕捉されていた原子は捕捉部 101 から解放された状態となり、例えば、重力により落下する。

【0022】

なお、ステップ S401 の段階で、第 1 磁場 131 を捕捉部 101 に印加し、この印加を停止して原子を供給した後で、ステップ S406 の段階で、第 2 磁場 132 を捕捉部 101 に印加してもよい。

【0023】

上述した各磁場の印加について説明すると、まず、ステップ S401 の段階で磁場を印加し、ステップ S402 で冷却されることで、超伝導状態とされた捕捉部 101 には、ステップ S404 で磁場を遮断されることで、フラクソイド保存則により閉ループ形状の超伝導体である捕捉部 101 の内側を貫く全磁束が保存されるように、閉ループ形状に沿って永久電流が流れ、不均一な磁場が形成されるようになる。

【0024】

この状態で、ステップ S401 の場合とは逆向きの均一な反転磁場を、貫通孔 101a を貫くように捕捉部 101 に印加すると、捕捉部 101 の閉ループ形状に沿って流れる永久電流は、フラクソイド保存則により上述の状態から変化するが、この永久電流による不均一磁場と、この磁場とは逆向きで磁場印加部 103 が発生する均一な磁場とにより、不均一な反転磁場が捕捉部 101 の近傍に形成されるようになる。このように、ステップ S406 の反転磁場印加により、捕捉部 101 の近傍には、捕捉部 101 に流れる永久電流による不均一磁場と、磁場印加部 103 により印加された反転磁場による不均一な反転磁場とが形成されることになる。

【0025】

上述した 2 つの磁場が重畳されることにより、図 5 に示すように、冷却部 102 の側とは反対側の捕捉部 101 の閉ループ形状中央部近傍の中心部 501 から、この外側に向けて 3 次元的に磁場の強さが増幅する 3 次元不均一磁場 502 が形成されるようになる。例えば、冷却部 102 に対して大地の側に捕捉部 101 を配置すれば、捕捉部 101 の中央部の大地側（下部）の中心部 501 を中心とした 3 次元不均一磁場 502 が形成される。なお、図 5 は、捕捉部 101 に流れる永久電流による磁場と磁場印加部 103 による反転磁場とにより、冷却部 102 に冷却される捕捉部 101 の近傍に形成される不均一磁場の形状を示す断面図である。図 5 では、捕捉部 101 の中心を通る平面によって切断して得られる断面形状を模式的に示し、不均一磁場の等磁場面を曲線で示している。

【0026】

中心部 501 は、3 次元不均一磁場 502 の磁場勾配によるポテンシャルの極小点（3 次元的な極小点）であり、この領域に、供給された原子が捕捉されるようになる。捕捉部 101 を構成する超伝導体近傍の磁場から斥力を受ける原子は、磁場の強いところでエネルギーが高くなる量子状態にあり、これを冷却し、上述したように不均一な磁場が形成されている捕捉部 101 の近傍（中心部 501）に配置すれば、3 次元不均一磁場 502 の磁場勾配によるポテンシャルにより、中心部 501 に原子を 3 次元的に閉じ込める（捕捉する）ことができる。

【0027】

磁場が高いところでエネルギーが高くなる量子状態の原子としては、例えば、 ^{87}Rb （ $|F=2, m_F=+2\rangle$ ）がある。また、アルカリ土類金属や希ガス原子でもよい。このような、磁場が高いところでエネルギーが高くなる量子状態の原子であれば、本実施の

10

20

30

40

50

形態における原子捕捉装置による原子捕捉が可能である。

【 0 0 2 8 】

上述した本実施の形態における閉ループ形状の超伝導材料により形成される原子のトラップは、閉ループ形状の回路に電流を駆動する配線や電源等特別な構造が不要である。また、Z型等の回路形状を必要としないため、本実施の形態の原子捕捉装置は、設計上の自由度が極めて高いものとなる。

【 0 0 2 9 】

ところで、印加する均一磁場の方向は、捕捉部 1 0 1 が成す平面に対して垂直な状態である必要はない。例えば、捕捉部 1 0 1 の閉ループを貫く磁場であれば、上述同様に、不均一な磁場を形成することは可能である。ただし、印加する磁場の方向を、捕捉部 1 0 1 が成す平面に対して垂直な方向とすることで、より安定した磁場の極小点が形成でき、より安定して原子を捕捉することが可能になるものと考えられる。

10

【 0 0 3 0 】

また、ステップ S 4 0 1 で印加する磁場（第 2 磁場 1 3 2）の強さは弱めることが可能であり、例えば、ステップ S 4 0 1 で印加する磁場がゼロであっても良い。言い換えると、捕捉部 1 0 1 を超伝導転移温度以下に冷却し、捕捉対象の原子を捕捉部 1 0 1 の近傍に配置した後、閉プール状の捕捉部 1 0 1 の貫通孔 1 0 1 a を貫く磁場（第 1 磁場 1 3 1）を印加すれば、上記原子を捕捉部 1 0 1 の近傍に捕捉することができる。

【 0 0 3 1 】

ただしこの場合、不均一磁場の形状は、図 5 を用いて説明したように、1 点を極小点として、その点から外側に向けて 3 次元的に磁場が強くなる形状とはならない。この場合、不均一磁場の形状は、図 6 に示すように、捕捉部 1 0 1 の閉ループの内側にできるドーナツ型の形状となる。

20

【 0 0 3 2 】

なお、図 6 は、捕捉部 1 0 1 に流れる永久電流による磁場により、冷却部 1 0 2 で冷却される捕捉部 1 0 1 の近傍に形成される不均一磁場の形状を示す断面図である。図 6 では、捕捉部 1 0 1 の中心を通る平面によって切断して得られる断面形状を模式的に示し、不均一磁場の等磁場面を曲線で示している。捕捉部 1 0 1 が円環状である場合、磁場の極小点は 3 次元的にドーナツ型となることを示している。

【 0 0 3 3 】

なお、本発明は以上に説明した実施の形態に限定されるものではなく、本発明の技術的思想内で、当分野において通常の知識を有する者により、多くの変形が実施可能であることは明白である。例えば、図 7 の平面図に示すように、冷却部 1 0 2 に、複数の捕捉部 1 0 1 を配置し、複数の磁場極小点を形成するようにしてもよい。また、図 8 の平面図に示すように、複数の貫通孔 8 0 1 a を備える捕捉部 8 0 1 を用いるようにしてもよい。

30

【産業上の利用可能性】

【 0 0 3 4 】

本発明は、高い設計自由度を有するので、高感度な原子干渉計を構成するための原子導波路として利用することが期待できる。また、本発明の原子捕捉装置は、原子の量子状態の変換、および記憶・制御手段としての応用も期待できる。

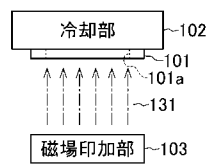
40

【符号の説明】

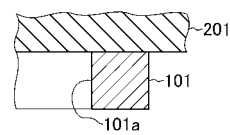
【 0 0 3 5 】

1 0 1 ... 捕捉部、1 0 1 a ... 貫通孔、1 0 2 ... 冷却部、1 0 3 ... 磁場印加部、1 3 1 ... 第 1 磁場、1 3 2 ... 第 2 磁場。

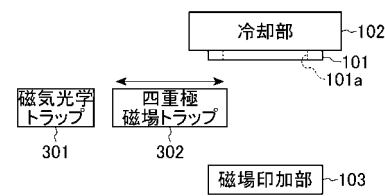
【図 1 A】



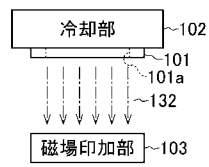
【図 2】



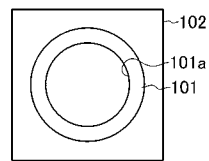
【図 3】



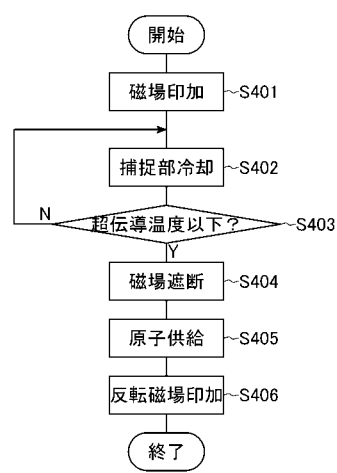
【図 1 B】



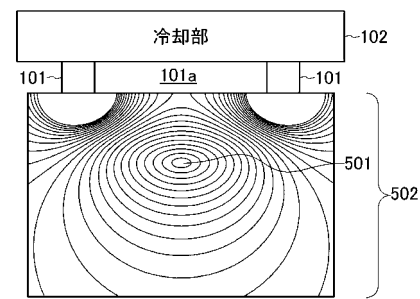
【図 1 C】



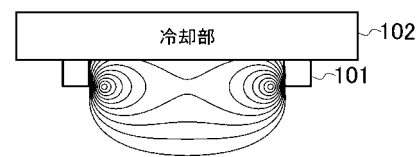
【図 4】



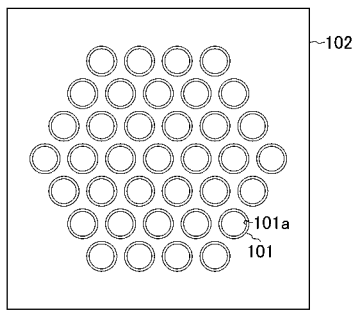
【図 5】



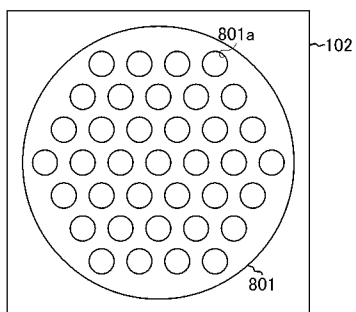
【図 6】



【図 7】



【図 8】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開2008-173745(JP,A)

J. D. Weinstein and K. G. Libbrecht, "Microscopic magnetic traps for neutral atoms", PHYSICAL REVIEW A, 米国, The American Physical Society, 1995年 9月, VOLUME 52, NUMBER 5, pp.4004-4009

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01L 39/00

B82B 3/00