

平成21年5月29日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19540424

研究課題名（和文） 省電力型原子チップの研究

研究課題名（英文） Research for power-saving atom chips

研究代表者

兵頭 政春（HYODO MASAHARU）

（独）情報通信研究機構・未来 ICT 研究センターナノ ICT グループ・主任研究員

研究者番号：30359088

研究成果の概要： 六重極磁場補償型電流パターン用いたミラー磁気光学捕獲装置（ミラーMOT）を開発し、ルビジウム原子を超高真空中で捕獲・冷却する実験を実施した。従来のミラーMOTで避けることができなかった磁場の歪みが改善された結果として、従来のミラーMOTよりも少ない電力で原子が効率的に捕獲されることを実証した。さらに、横方向磁場をほとんど必要としないS型磁気トラップを開発し、従来よりも少ない電力で原子チップ上に磁気トラップを構成できることを実証した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	3,100,000	930,000	4,030,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野： 数物系科学

科研費の分科・細目： 物理学 原子・分子・量子エレクトロニクス・プラズマ

キーワード： ルビジウム・磁気光学トラップ・磁気トラップ・原子チップ

1. 研究開始当初の背景

原子チップは、超高真空中に設置された平面基板の表面近傍にルビジウムなどの中性原子を冷却・捕獲し、原子の量子状態を制御することによって様々な新機能を発現させることを目的とした新世代の素子であり、原子干渉計、量子情報処理装置、磁場や回転速度の高感度センサーなどへの応用が期待されている。

これまでに、原子チップ上でのボース凝縮体の生成実験やマイケルソン型原子干渉計による干渉実験などが行われているが、いず

れも原子を捕獲するために強力な磁場を必要とし、実験装置には巨大な電磁石や大電流電源が使用されていた。実用化を念頭に置いた場合は装置の小型化、軽量化が不可欠であるが、省電力化を含めてそのような取り組みはほとんど行われてこなかった。電磁石の代わりに永久磁石を用いる試みも一部で行われていたが、原子の操作性がかなり限定されるため応用分野は限られていた。

2. 研究の目的

本研究課題は、研究代表者が考案した特殊

な電流パターンを用いた原子トラップを試作してルビジウム原子を超高真空中で捕獲・冷却する実験を行うことにより、従来のミラー磁気光学捕獲装置(ミラーMOT)で避けることができなかった磁場の歪みを改善し、従来のミラーMOTよりも少ない電力で原子が効率的に捕獲されることを実証するとともに、横方向磁場をほとんど必要としないS型磁気トラップ(MT)を開発し、従来よりも少ない電力で原子チップ上に磁気トラップを構成できることを実証することを目的として行われた。

3. 研究の方法

初年度は、考案した六重極磁場補償型の特殊な電流パターンを用いた原子トラップを用いてルビジウム原子を超高真空中で捕獲・冷却し、従来型のミラーMOTと比較して原子がより効率的に捕獲されること、さらに従来よりも少ない電流でMTを構成できることを実証するため、シミュレーションによる検討と実験を行った。

まず、電流パターンによって発生する磁場の高次多重極補償を実現するための条件をシミュレーションによって系統的に調査・解析し、試作した導体構造体の最適な動作条件を決定した。

次に、この構造体を既存の超高真空装置内に設置してミラーMOTを構成し、ルビジウム原子の冷却・捕獲実験を行った。特に従来型の磁場補償を行わないタイプのミラーMOTとの比較を行い、捕獲される原子数に着目して動作特性を吸光イメージング法によって詳細に調べた。

次年度は、六重極磁場補償型ミラーMOT(以下、HPC-MMOTと略す)で捕獲した冷却原子をさらにレーザー冷却し、光ポンピングを得てS型MTへ高効率に移行する実験を行った。この実験において、光ポンピング条件や磁場の立ち上げ条件の最適化を実施し、従来型MTとの比較検討を行った。

光ポンピングにおいてはレーザー光の照射条件に対する原子のポンピング効率に着目し、磁場とレーザー光の適切な照射によって基底状態の特定磁気副準位($F=2, m_F=+2$)に励起される原子数の割合を吸光イメージング法によって詳細に計測した。また、MTにおいては光ポンピングからの原子の移行効率に着目し、磁場の立ち上げ時間の短縮や電磁石相互のタイミング調整を実施して移行効率の改善を図った。また、消費電流の大きさに着目して、動作特性を吸光イメージング法や飛行時間測定法によって調べ、加熱の有無などを勘案して従来型MTとの比較検討を行った。

また、研究期間内に得られた研究成果をまとめて学会発表を行い、査読付き論文誌へ投

稿するとともに、小型で高感度な原子センサーへの応用に関する検討を行った。

4. 研究成果

図1に試作したHPC-MMOTの主要部となる導体構造のレイアウトを示す。細い中央導体の両側に平行して2本の太い補助導体が配置され、導体間を2本の短い導体で短絡させた構造である。

図2(a)は、中央導体を流れる電流 I_1 のみによって形成される捕獲領域の磁場形状の計算結果であり、図2(b)は補助導体を流れる電流 I_2 によって捕獲領域の六重極磁場成分を打ち消した状態の磁場の計算結果である。

(b)では等ポテンシャル面の同心円構造が著しく改善され、捕獲領域近傍の四重極領域が格段に広がる効果が明瞭に示されている。補助導体を増設することにより、任意の高次多重極成分をも選択的に打ち消すことができることも明らかにした。

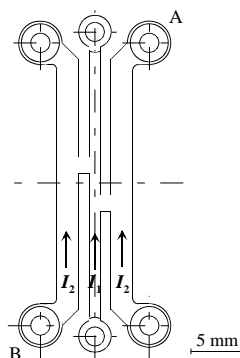


図1 実験に使用した原子トラップの主要部の構造

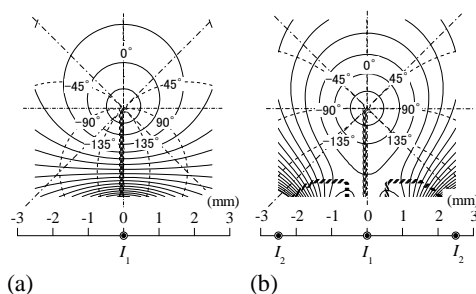


図2 ミラーMOTが作る磁場構造の計算結果の比較図。右図では六重極磁場補償の効果が明瞭に示されている。

この構造体を既存の超真空装置内に設置し、構造体に近接して直径25 mmの全反射鏡を設置し、反射鏡に向かって4方向から波長780 nmの冷却光とリポンプ光を照射した。冷却光とリポンプ光の波長は飽和吸収分光装置を用いた負帰還制御によって安定化した。外部の電磁石を用いて適当なバイアス磁場を付加することによってミラーMOTを構

成すると、最大で約 7×10^7 個のルビジウム原子が中央導体から 3.6 mm の位置に安定に捕獲された。

捕獲された原子数を吸光イメージング法を用いて測定し、HPC-MMOT と従来のミラーMOT との比較を行った結果を図3に示す。横軸は冷却光のビーム径であり、比較を容易にするため原子数の比も併せて描いてある。ビーム径が 5mm 以下の場合には両者にほとんど違いはないが、ビーム径が 10mm 以上の場合に磁場補償を行った場合の方が原子数が従来の約 2 倍になって顕著な効果が得られていることがわかる。これは、ビーム径が小さい場合は図2の原点付近の磁場を利用するため両者とも四重極成分が卓越して磁場補償の効果が小さいが、ビーム径が大きい場合は図2の改善された磁場領域全体を利用することになるため、磁場構造の違いが明瞭になった効果と考えられ、捕獲原子数の増加が磁場補償の効果を反映した結果であることが実証された。さらにレーザー光の離調、磁場勾配等のパラメータに対する依存性も詳しく調べたところ、いずれもこの結論を支持する結果が得られた。

開発した HPC-MMOT はより小さい磁場で従来と同じ数の原子を捕獲することが可能であるため、消費電力を従来の四分の一以下にまで低減することが可能である。

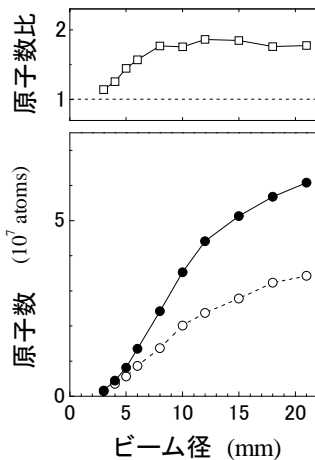


図3 ミラーMOTによって捕獲された原子数の比較結果

次に、HPC-MMOT で捕獲されたルビジウム原子を高効率に MT へ移行させる実験を行った。筆者らは MT で通常用いられる Z 型導体の代わりに Z 型導体の腕の部分さらに直角に折り曲げた S 型構造を提案しており、両者が形成する磁場構造の計算結果を図4に示す。磁場構造の違いはほとんどないが、S 型では折り曲げた腕の部分が横方向磁場を補完するため、捕獲性能を損なわずに横方向パ

ラス磁場を軽減させることができるため、より低消費電力での動作が期待できる。

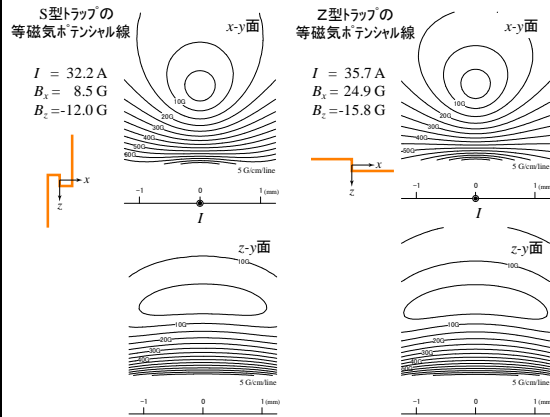


図4 S型MTとZ型MTの磁場構造の比較

図1の導体は S 型導体を兼用しており、端子Aから端子Bに向かって電流を流すことにより、S型の電流パターンを用いた MT が構成される。原子を MT で捕獲するためには、原子の状態を $5S_{1/2} (F=2, m_F > 0)$ の磁気副準位に揃える必要がある。そのため、MOT を圧縮した後に 2 ms のモラセス冷却を行い、z 軸方向に一樣磁場を付加して $10 \mu\text{W}$ の共鳴光を 1.7 ms 間照射することにより光ポンピングを実施した。その直後に S 型導体に直流電流を流して MT を立ち上げると、磁気副準位の揃った原子のみが MT に捕獲された。MT を 30 ms 間維持してから原子を解放し、プローブ光を $100 \mu\text{s}$ 間照射して吸光イメージを取得し、得られた画像を解析することによって MT に捕獲された原子数と温度を測定した。

表1に各移行段階における原子数と温度の測定結果を示す。

表1 各移行段階での原子数と温度の比較

移行段階	HPC-MMOT		従来型MMOT	
	原子数	温度	原子数	温度
MMOT	7.2×10^7	183 μK	3.3×10^7	155 μK
モラセス	5.8	11	2.5	11
光ポンピング	5.5	51	2.6	41
MT	3.9	48	2.0	32

HPC-MMOT の場合、モラセス冷却直後までの間に 11 μK まで効果的に冷却されているが、MOT を圧縮する過程で約 20% の原子が失われていることがわかる。また、光ポンピングを行うことによって原子が若干加熱されるが、最終的に 54% の原子が MT へ移行できていることもわかる。一方、従来型ミラーMOT の場合は、原子数はすべての段階で HPC-MMOT の場合の 1/2 しか得られておらず、磁場補償の効果が改めて確認された。HPC-MMOT において温度が若干高めに測定されている理由は現段階では不明である。

光ポンピングから MT への移行効率は約 70% であるが、この効率低下の原因にはスピン偏極の不完全性および MOT と MT との間のポテンシャル形状の不整合性が考えられる。両者の寄与を調べるため、光ポンピング中に付加する磁場の強さを変えて MT での捕獲効率を測定した結果を図 5 に示す。捕獲された原子数は磁場と共に単調に増加し、+0.6 G を付加したときに移行効率はほぼ最大となった。この実験結果から、スピンの最大偏極率は 90% と見積もられ、ポテンシャル形状の不整合による捕獲効率は 80% 程度と推定された。これは従来の Z 型トラップで報告されているものと同程度であり、低消費電力の S 型トラップを従来の Z 型トラップに置き換えて使用できることが実証された。

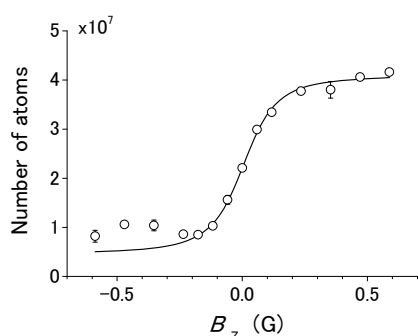


図 5 S 型トラップで捕獲された原子数の光ポンピング磁場に対する依存性

以上の基本特性に関する研究成果をまとめて 2 件の論文発表と 4 件の学会発表を行った。

本研究で得られた成果は、中性原子の表面捕獲効率の向上、原子チップの小型化、省電力化を実現する上で極めて有用な技術になるものと期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Ryuzo Ohmukai, Masaharu Hyodo, Masayoshi Watanabe, and Hitoshi Kondo, "Efficient generation of cold atoms towards a source for atom lithography," *Optical Review* Vol. 16, No. 1, pp. 11-14 (2009). (査読有り)
- ② Masaharu Hyodo, Kazuyuki Nakayama, Masayoshi Watanabe, and Ryuzo Ohmukai, "Mirror magneto-optical trap exploiting hexapole-compensated magnetic field," *Phys. Rev. A* Vol. 76, No. 1, 013419/1-3 (2007). (査読あり)

[学会発表] (計 4 件)

- ① 兵頭政春 他 3 名, 「冷却原子のスピン偏極の計測と磁気トラップへの捕獲効率の最適化」; 日本光学会年次学術講演会 (OPJ2008), 2008 年 11 月 4-6 日, つくば国際会議場.
- ② 兵頭政春 他 3 名, 「原子による慣性センシングの実現へむけた表面捕獲装置の開発」; ナノ ICT シンポジウム 2008 (依頼講演), 2008 年 2 月 13 日, 東京ビッグサイト.
- ③ Masaharu Hyodo, et al., "Experiment on mirror magneto-optical trap using hexapole-compensated magnetic field," *International Symposium on Coherent Optical Science*, December 15, 2007, Tokyo, Japan.
- ④ Masaharu Hyodo, et al., "Characterization of Magnetic-Hexapole-Compensated Mirror Magneto-Optical Trap," *The Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim 2007 (CLEO/Pacific Rim 2007)*, August 29, 2007, Seoul, Korea.

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称: 「Neutral atom trapping device」

発明者: 兵頭政春

権利者: (独) 情報通信研究機構

種類: 特許

整理番号: 外 355-US

出願年月日: 2007 年 3 月 6 日

国内外の別: 国外

名称: 「中性原子のトラップ装置」

発明者: 兵頭政春

権利者: (独) 情報通信研究機構

種類: 特許

番号: 特願 2006-61964

出願年月日: 2006 年 3 月 8 日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

兵頭 政春 (HYODO MASAHARU)

(独) 情報通信研究機構・未来 ICT 研究センター
ナノ ICT グループ・主任研究員

研究者番号: 30359088

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし