

光近接場による原子の偏向と検出

伊藤 治彦^{*,***}・戸塚 弘毅^{**}・大津 元一^{*,**}

Atom Deflection and Detection with Optical Near Fields

Haruhiko ITO^{*,***}, Kouki TOTSUKA^{**} and Motoichi OHTSU^{*,**}

A slit-type deflector can be used for precise control of atomic motion by optical near field. The deflected atoms are observed with a slit-type detector supported by two-color optical near fields with a spatial resolution of 100 nm. Two-step photoionization and two-step resonant excitation followed by blue fluorescence are available for detection. Cold atoms are guided through a blue-detuned hollow light beam from a magneto-optical trap to the slit-type deflector. ⁸⁷Rb atoms with a mean velocity of 6 m/s can be deflected with a large angle of 0.36 degree and detected with a high efficiency of 38%.

Key words: atom deflection, atom detection, atom guide, optical near field, dipole force

1. 原子偏向器

光との相互作用を利用して原子を制御する、原子光学手法によって微小構造物を作ることが期待されているが、回折限界のために伝搬光では三次元的にナノスケールのもを作るのは原理的に困難である。実際、定在波による線状パターンの作製が行われているが¹⁾、任意形状の作製についての報告はこれまでなされていない。原子光学的手法でドット形状のナノ構造物を作製するためには光近接場を用いるのが有効である²⁻⁶⁾。そのひとつとして、光近接場が及ぼす双極子力によって原子の運動方向を制御する原子偏向器の開発を行っている⁷⁾。

図1に示すように、シリコン-オン-インシュレーター基板をフォトリソグラフィと化学エッチングで加工して作製した幅100 nm、長さ100 μmのスリットの片方のエッジ部に、原子の共鳴周波数よりわずかに周波数を高くした正離調レーザー光を結合させて光近接場を誘起する。光近接場領域に進入してきた原子は斥力の双極子力を受けて、運動方向が変化する。この偏向器ではエッジ部の角度およびアルミニウムの金属コーティングの厚さを調整することによって、光近接場の発生領域がスリット幅とほぼ等しくなるように制御している。光近接場領域に入らない原子はV溝部でブロックされる。

2. 原子検出器

前述の原子偏向器では、基底状態にある原子が偏向される。中性原子の検出にはマイクロチャンネルプレートや二次電子増幅法が用いられているが⁸⁾、準安定状態の原子の検出には有効であるものの、基底状態の原子に対しては効率が悪い。また、空間分解能もたかだか1 μmと低く、光近接場を用いた高精度な原子制御には不十分である。

スリット幅100 nmの原子偏向器では後方1 cmの距離で10 μm程度の入射方向からの変位を得ることができる。この偏向原子を1%以上の確度で位置検出するために、幅100 nm以下のスリットを有する原子検出器を作製した⁹⁻¹²⁾。図2に示すように、V溝側から2波長のレーザー光を照射し、スリット部に2色の光近接場を誘起する。V溝構造のため偏向をスリットに垂直になるように選べば、高スループットで光近接場を励起することができる。

光近接場領域に進入してきた原子を2色の光近接場による2段階光イオン化¹⁰⁾または2段階共鳴励起で生じる蛍光の観測¹²⁾によって検出する。ルビジウム(Rb)原子の場合、2段階光イオン化では波長780 nmの半導体レーザー光によって5S_{1/2}基底状態から5P_{3/2}状態へ励起し、次いで波長476.5 nmの高出力アルゴン・イオンレーザー光によってイオン化レベルへ励起する。陽イオン化したRb原子を-3

*東京工業大学大学院総合理工学研究科 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町 4259) ***E-mail: ito@ae.titech.ac.jp

**科学技術振興事業団 ERATO「局在フォトン」プロジェクト (〒194-0004 町田市鶴間 687-1 天幸ビル4階)

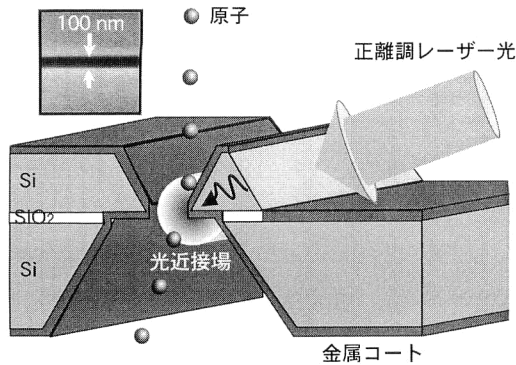


図1 スリット型原子偏向器。正離調レーザー光照射によってスリットのエッジ部に誘起した光近接場から斥力の双極子力を受けてスリットの開口部へ原子の運動方向が変化する。シリコンオンインシュレーター基板を加工して、幅 100 nm、長さ 100 μm のスリットを作製している (左上の走査電子顕微鏡写真を参照)。

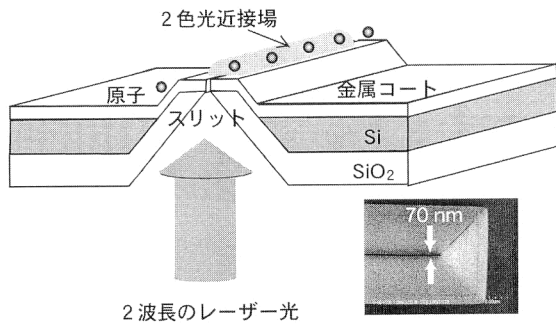


図2 スリット型原子検出器。2波長のレーザー光をV溝側から入射してスリット部に2色の光近接場を誘起し、進入してきた原子を2段階光イオン化もしくは2段階共鳴励起する。前者ではチャンネル電子増倍管でイオン計数を行って、後者では原子が緩和する際に発する青い蛍光を分光して検出する。幅 70 nm、長さ 100 μm のスリットを作製している (右下の走査電子顕微鏡写真を参照)。

kV の負バイアスを印可したチャンネル電子増倍管によって計数計測する。冷却原子の場合、20%以上の効率で検出することができる¹⁰⁾。

2段階共鳴励起では、波長 780 nm と 775 nm の2つの半導体レーザー光を用いて $5P_{3/2}$ 状態を介して $5S_{1/2}$ 基底状態から $5D_{5/2}$ 状態へ励起する。その後、Rb 原子は緩和して $6P_{3/2}$ 状態から $5S_{1/2}$ 状態へ遷移するときに波長 420 nm の青い蛍光を発する。この蛍光を光ファイバーで集光し干渉フィルターをつけた分光器に入れて計測する。原子が十分に冷却されていれば3%以上の効率で検出することが可能である¹¹⁾。本方法は2段階光イオン化と比べると検出効率の点で劣るが、測定系が簡単なほか、強いレーザー光を使用しなくてもよい利点がある。

3. 冷却原子の誘導と偏向角の評価

作製したスリット型原子偏向器および検出器では 100 nm 以下の寸法の光近接場を用いるため、それとの相互作用

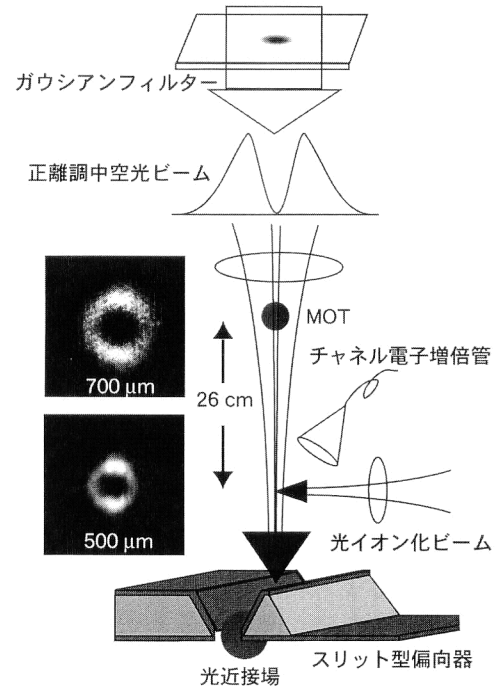


図3 冷却原子の誘導。ガウシアンフィルターによって中空光ビームをつくり、正離調下で MOT から落下する冷却原子を中空領域に閉じ込めスリット型偏向器に送り込む。26 cm 下方で光イオン化によって誘導原子の速度分布とフラックスを計測する。中空径は MOT の位置で 700 μm 、計測位置で 500 μm である。

用を起こすためには速度の遅い冷却された原子が必要である。図3のように、磁気光学トラップ (MOT) および偏光勾配冷却¹³⁾ によって平均温度 10 μK の原子集団をつくったのちトラップを切って自由落下させ、正離調した中空の光ビームによって偏向器のスリット部まで誘導する。ここで原子は斥力の双極子力によって中空部分に閉じ込められる。ガウシアンフィルターを通してつくったパワー 600 mW、正離調+1 GHz の中空光ビームを 26 cm 下方で中空径 500 μm に集光し、直径 2 cm の MOT から ^{87}Rb 原子のロードを繰り返すことによって、速度 $6 \text{ m/s} \pm 0.6 \text{ m/s}$ 、フラックス $0.9 \times 10^{13} \text{ atom/cm}^2 \cdot \text{s}$ の冷却原子ビームを得ている。原子の誘導効率は 80% で、偏向を行ううえで十分なフラックスとなっている。偏向の実証実験は現在進行中である。

図4に速度 6 m/s でスリット型偏向器に入射した場合の ^{87}Rb 原子の偏向角をスリット端からの距離の関数として計算した一例を示す (近接場光強度を 10 W/cm^2 、正離調を +1 GHz としている)。ファンデルワールス引力による斥力ポテンシャルの減少を考慮に入れると、最大偏向角は 0.36 度となる。作製したスリット型検出器で近接場光イオン化を行えば、100 nm の空間分解能で偏向原子の 38% を検出できることになる。

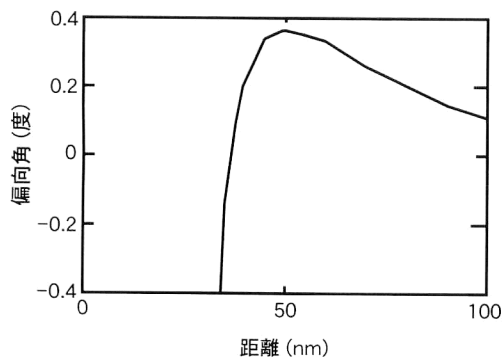


図4 スリット端からの距離の関数としてプロットした偏向角. 速度 6 m/s の ^{87}Rb 原子に対する計算例を示す. スリット端に近い領域ではファンデルワールス引力が強くなり反対方向に曲げられる.

4. 原子偏向技術の応用

偏向に用いる双極子力ポテンシャルの大きさは光強度と周波数離調に依存するため, これらによって偏向角を制御することができる. 前述したような速度分布の小さな冷却原子ビームを用いれば, 特定の種類の原子のみを基板上の狙った位置まで送り込むことが可能である.

光近接場の応用範囲はさらに広がりを見せているが, 光近接場そのものの測定は一般にプローブなどを用いて破壊的に行われ絶対評価が難しいのが現状である. 原子偏向法では原子の大きさが光近接場のそれより小さいため, 原子をプローブとすることによって非破壊的に光近接場を調べることができる. 未解明の光近接場-原子相互作用の詳細な研究やナノ領域での共振器量子電気力学効果の解明などにも威力を発揮するであろう.

文 献

1) R. W. McGowan, D. M. Giltner and S. A. Lee: "Light force cooling, focusing, and nanometer-scale deposition of aluminum atoms," *Opt. Lett.*, **20** (1995) 2535-2537.

2) H. Ito and M. Ohtsu: "Near-field optical atom manipulation: Toward atom photonics," *Near-Field Nano/Atom Optics and Technology*, ed. M. Ohtsu (Springer-Verlag, Tokyo, 1998) pp. 217-266.

3) 伊藤治彦, 大津元一: "光近接場を用いた原子の制御", *光学*, **28** (1999) 610-615.

4) H. Ito, A. Takamizawa, H. Tanioka and M. Ohtsu: "Precise control of atoms with optical near fields: Deflection and trap," *Proc. SPIE*, **3791** (1999) 2-9.

5) M. Ohtsu, K. Kobayashi, H. Ito and G. -H. Lee: "Nanofabrication and atom manipulation by optical near-field and relevant quantum optical theory," *Proc. IEEE*, **88** (2000) 1499-1518.

6) H. Ito, A. Takamizawa, H. Tanioka, K. Totsuka and M. Ohtsu: "Toward near-field optical manipulation of atoms using a nanometric fiber probe," *2000 International Quantum Electronics Conference (IEEE, Nice, 2000)* p. 106.

7) K. Totsuka, K. Yamada, H. Ito and M. Ohtsu: "Atom deflector with optical near fields," *Technical Digest of 2002 Quantum Electronics and Laser Science Conference (OSA, Long Beach, 2002)* p. 66.

8) Ch. Kurtsiefer and J. Mlynek: "A 2-dimensional detector with high spatial and temporal resolution for metastable rare gas atoms," *Appl. Phys. B*, **64** (1997) 85-92.

9) H. Ito, K. Totsuka, T. Kawamura, T. Yatsui and M. Ohtsu: "Near-field optical detection of atoms with high sensitivity and high spatial resolution," *Technical Digest of CLEO/Pacific Rim 2001*, 1 (IEEE, Chiba, 2001) pp. 514-515.

10) K. Totsuka, H. Ito, T. Kawamura and M. Ohtsu: "High spatial resolution atom detector with two-color optical near fields," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41** (2002) 1566-1571.

11) K. Totsuka, H. Ito and M. Ohtsu: "Fluorescence spectroscopy of Rb atoms with two-color optical near fields for a high-resolution slit-type detector," *IEICE Trans. Electron.* (2002) in press.

12) K. Totsuka, T. Kawamura, T. Yatsui, H. Ito and M. Ohtsu: "A slit-type near-field optical detector for neutral atoms with high sensitivity and nanometric resolution," *Technical Digest of 2001 Quantum Electronics and Laser Science Conference (OSA, Baltimore, 2001)* p. 110.

13) H. J. Metcalf and P. van der Straten: *Laser Cooling and Trapping* (Springer, New York, 1999).

(2002年6月1日受理)