

原子ガイディングにおける光波シンセシス

大向 隆三・渡辺 昌良

Atom Guiding and Lightwave Synthesis

Ryuzo OHMUKAI and Masayoshi WATANABE

The remarkable capabilities of precise handling of atoms with the laser cooling technique have led to great advances in the field of atom optics, where atoms are controlled by light just as light is controlled by optical elements. The improvements in coherent light sources have played important roles in the progress of this field. A variety of experimental schemes on atom optics are now being performed intensively by controlling the properties of light in various aspects. We will review the present situation and future prospect for atom guiding based on the lightwave synthesis technology.

Key words: atom guiding, laser cooling, atom optics, scattering force, dipole force

近年、周波数可変の狭スペクトルレーザー光源の進展とあいまって、レーザー光が原子に及ぼす力を用いた原子の運動制御・レーザー冷却技術が著しい進歩を遂げている。このような原子操作の手法は、通常の「光学」とは異なり、光の場を用いて原子を制御する新たな「原子光学」とよばれる分野を生み出した。この原子光学研究に関しては、量子縮退した原子の分光実験や原子干渉計の開発など基礎物理学的な意義をもつ実験をはじめ、原子リソグラフィや原子ホログラフィーなど次世代マイクロファブリケーションのための工業応用上重要な技術にいたるまで、幅広く研究対象として、現在多くの研究者が特に精力的に取り組んでいる分野である。

原子がレーザー光から受ける力は、散乱力と双極子力に分けることができる。前者は、原子が光（フォトン）を吸収・放出するときに受ける運動量変化を引き起こす撃力である。それに対して、後者は空間的に不均一な強度分布をもつ光の場の中に原子が存在するときに、その光の場と、原子内に誘起された双極子との相互作用の結果生じる力である。双極子力は光の強度勾配に応じた大きさを持ち、周

波数離調の符号によって力の向きが決まる。現在行われている原子運動制御・ガイディング実験の手法は基本的にこれら2つの力を巧みに組み合わせたものである。光学的配置の立体構成や外場（電場や磁場）の印加方法に加え、光源として用意する光の特性（周波数、強度分布、モード、偏光など）をさまざまにコントロールすることによって、多様な、かつ高性能な原子制御・ガイディングが可能になると期待されている。

本稿では、現在すすめられている原子ガイディングの技術のうち、いくつかの代表的な技術および近い将来に大きな進展が期待できそうな斬新な技術について取り上げ、議論する。

1. ドーナツ型光ビームによる原子ガイディング

原子の運動制御の基本的な要素のうち、集束技術は早くから取り組まれてきた課題である。レーザー光の断面の強度分布がガウス分布になっていることを利用し、原子線と同方向に進みながら集束していく光ビームの双極子力を用いて初めて原子線集束が行われた¹⁾。また、Balykinらは散

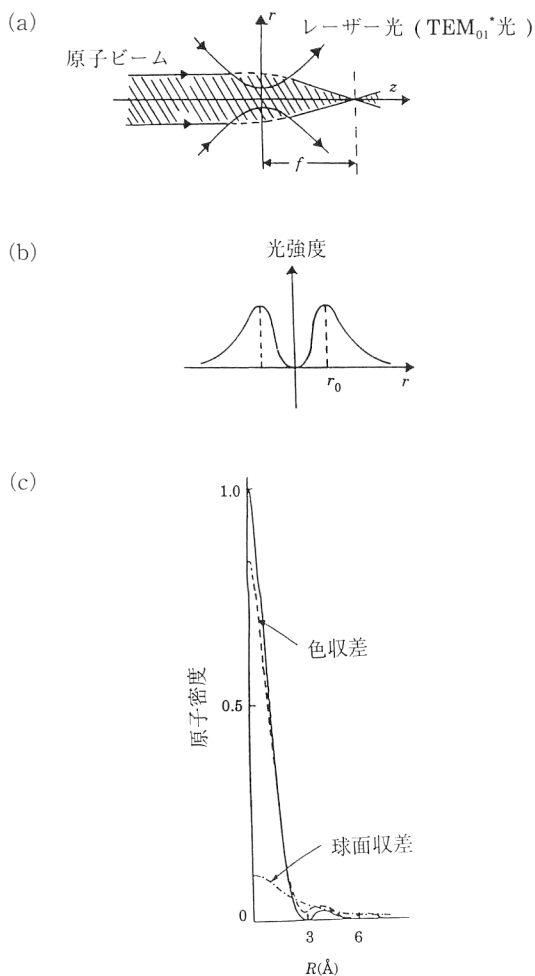


図1 TEM₀₁*モード光による原子線集束実験概念図。(a) レーザーと原子線の配置、(b) TEM₀₁*光の断面強度分布、(c) 焦点面における原子密度分布。実線は収差なし、点線は色収差、一点鎖線は球面収差を考慮した場合の計算結果。

乱力を利用した原子レンズの実験を行った²⁾。いずれも集束スポット径が数十 μm 程度まで達成されたが、集束過程における原子の運動量拡散が最小スポット径を制限してしまい、これ以上径を小さくすることはできない。そこでこの限界を克服するため、1987年にレーザー光のTEM (transverse electromagnetic)₀₁*モードを用いた原子の対物レンズが初めて提案された³⁾。実験概念図を図1(a)に示す。TEM₀₁*モードは、中心部で強度がゼロになる、いわゆるドーナツ型の強度分布をもつ光ビーム(図1(b))であって、それと同軸に原子ビームを通す。TEM₀₁*モード光の中空領域で双極子力ポテンシャルは極小値をとるから、原子線はこの光ビームの中空領域に沿ってガイドされ集束する。集束部では光の強度がゼロなので原子は光の吸収・放出を行わず、集束時に運動量拡散の影響を最小限に抑制することができる。原子線を平面ド・ブロイ波の重ね合わせと考え、TEM₀₁*光は原子レンズとしてレンズ軸からの

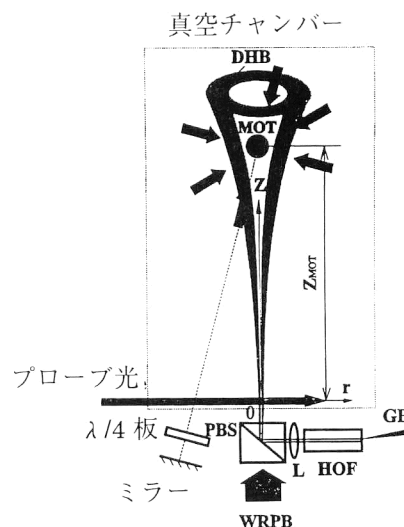


図2 中空ファイバーを用いたドーナツビーム生成実験配置。GBは入射ガウスビーム、HOFは中空ファイバーを示す。

距離に依存した位相透過関数をもつ透明媒質として取り扱おうと、焦点面上での原子の空間的な密度分布を計算できる。計算の結果、焦点スポット径の最小値はド・ブロイ波のレンズによる回折によってほとんど決まり、その他にも色収差、球面収差、レーザー光内の原子の光吸収・放出にともなう拡散収差などによって制限されるが、波長程度のスポットサイズをもつ1Wのレーザー光を用意すれば、実験パラメーターを適切に選択することによって数オングストローム程度までの原子線集束が可能であることが示されている(図1(c))。

上記を直接実証した実験はまだ報告されていないが、最近になってドーナツビームを使った冷却原子の分光実験がつつぎと報告されている。ドーナツビーム発生のための代表的な実験手法として、中空ファイバーを用いる方法がある。Jheらのグループは中空ファイバーを用いたドーナツビームの生成を実験的に示し、そのビームを使った冷却原子のガイド効率などについて理論的な検討を行った^{4,5)}。ガウス型強度分布をしたレーザー光出力をレンズによって中空ファイバーにカップリングさせた結果、ファイバー中でLP₀₁モードが選択的に励起された。ファイバー終端からこの光を取り出してレンズでコリメートし、ドーナツビームを得ることができる(図2)。ファイバーの中空径は7 μm のものを使用しており、ガウスビームからドーナツビームへのパワー変換効率は約50%であった。J. Yinらはドーナツビーム中でRb原子がガイドされる際に横方向運動成分がSisyphus冷却される機構を解析した⁶⁾。このSisyphus冷却効果と自然放出による加熱効果を考慮して計算した結果、原子の横方向の運動は最終的に2cm/s(温

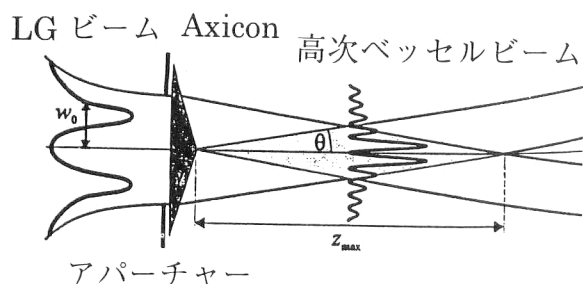


図3 Axiconを用いた高次ベッセルビーム発生法。

度に換算して $1 \mu\text{K}$ 程度) 以下にまで有効に抑制することができ、その結果 $2 \times 10^{13} (\text{sr}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1})$ という高輝度の原子線生成が可能であることが見積もられた。ドーナツビームをウェストサイズで $1 \mu\text{m}$ まで絞り、横方向には反跳限界近くまで Sisyphus 冷却できれば、文献3) で示された以上の原子線集束が期待できる。このような高輝度で指向性が高い低速原子源は原子描画用原子源として有望である。Yin らは文献5) 中に興味深い原子描画装置の提案を行っている。

このほかにも、ドーナツビーム発生のために外部共振器を利用したモード変換法⁷⁾、Axicon を使用した生成法^{8,9)}、透過型ホログラムを利用した生成法¹⁰⁾ などが報告されている。いずれも全光学的な原子ガイドの実現や原子の光重力トラップの形成に顕著な成果を取めている。

2. ベッセルビームによる原子のガイド

1987年に、Durnin らは自由空間におけるヘルムホルツ方程式が非回折なモードの解をもつこと、そしてそのような z 方向に伝搬する解について最も簡単な形では第1種のベッセル関数を用いて

$$\phi(x, y, z; k) = \exp(i\beta z) \cdot J_0(\alpha \rho) \quad (1)$$

と表されることを指摘した^{11,12)}。ただし、

$$\alpha^2 + \beta^2 = k^2, \quad k = \lambda / (2\pi), \quad x^2 + y^2 = \rho^2 \quad (2)$$

であり、 J_0 は0次の第1種ベッセル関数である。実際、この光の強度分布は動径方向の変数 ρ の関数となり、光軸方向には変化しない非回折光である。0次のベッセル光は中心部に強度の大きなピークがあり、高次のそれは逆に中心部分で強度ゼロのコアをもつ。このような非回折光ではビーム中心部の bright/dark spot 径そのものを光の波長程度にまで小さくすることができる。量子縮退に近づいた原子集団を考えると、温度はおおよそ 100 nK 程度であるので、これは原子のド・ブroy波長に換算すると $1 \mu\text{m}$ 程度に相当する。数 μm 程度以下にまでベッセルビームを絞り、超低温の原子集団をそのベッセルビームとカップリングさせることができれば、全光学的な原子の導波路のなかで原子

の干渉効果(スペックルパターンなど)を観測できると期待される。また、ナノメートルスケールの原子ドット形成や光の回折限界以下の微細加工にも応用できる。

ベッセルビーム発生についてはいくつかの試みがすでに報告されている。例えば0次ベッセルビームの発生は、ガウス型の強度分布をしたレーザー光を Axicon に照射することで得られている¹³⁾。Arlt ら¹⁴⁾ は、その手法を高次ベッセルビームの発生にまで拡張させた。直線偏光の He-Ne レーザー光を計算機ホログラムに照射し高次 LG モード光を発生させた後、それを Axicon に照射して出力光が近似的な高次ベッセルビームにモード変換できることを示した(図3)。1次ベッセルビームの内側の明るい環は最大 30 cm にわたってビームの広がり(回折)は観測されなかった。さらにベッセルビームが作り出す双極子力ポテンシャルを計算すると、モード変換する前の LG モード光に比べてポテンシャルの大きさが3倍に増大したうえ、中空(暗黒)領域の半径は $20 \mu\text{m}$ の小ささのまま距離 5 cm にわたり伝搬させることができることがわかった。Axicon を利用した LG モードからベッセルビームへの変換はほぼ100%の効率で行われており、ガウスビームから LG モードへの変換さえ効率よく行われれば、原子ガイドに十分な強度をもつベッセルビームの生成は市販のレーザー装置を用いてもそう困難ではないと思われる。

3. 光マスクを用いた原子ガイド(描画)

光で運動制御された原子を基板上で堆積させ、実際に光の波長スケールの周期をもつ微小構造物を作った最初の例として、光定在波による Na 原子グレーティングの作製報告がある¹⁵⁾。ここでは基板の直前に原子線に対して垂直な面内で形成された1次元光定在波の双極子力ポテンシャル場がリソグラフィ技術におけるマスクのような役割(光マスク)を果たす。原子はこの領域を通過するあいだに半波長間隔でチャネリングされてそのまま基板上へ堆積した結果、半波長周期の原子細線を作製することが可能となった。対象原子はその後 Cr^{16,17)} や Al¹⁸⁾ にまで拡張されている。

上記の実験スキームは容易に2次元へと拡張することができる。Drodofsky らは2枚のミラーを使って互いに 120° 方向に進む3本のレーザー光(7 mW)を用意し、これらの2次元干渉パターンを光マスクとして用いてさまざまな周期・構造をもつ Cr 原子構造物の作製に成功した¹⁹⁾。実験配置と結果を図4に示す。3本のレーザー光強度がすべてほぼ等しい条件で干渉縞が生じる領域と、そうでない領域が存在し、それぞれ周期 $(2/3)\lambda$ と $(1/\sqrt{3})\lambda$ の構造が作製さ

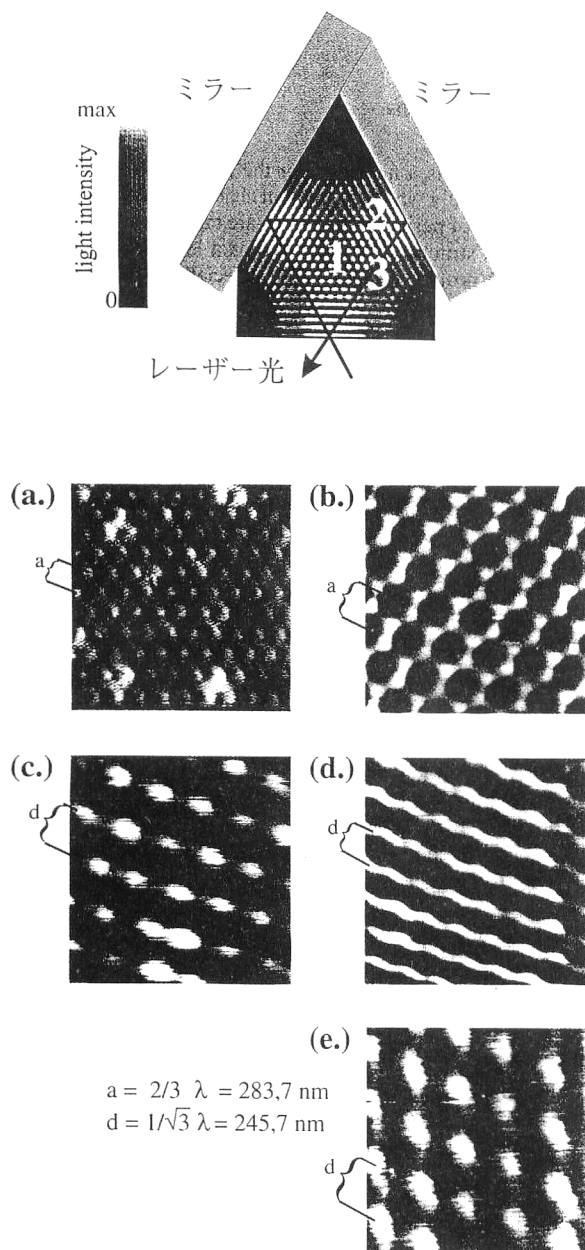


図4 光の干渉パターンを光マスクとした2次元原子描画実験図とその結果。(a), (c)は負離調, (b), (d), (e)は正離調のとき, (a), (b)は領域1, (c), (d)は領域2, (e)は領域3のパターンである。明るいところほど多くの原子が堆積し、高さが高いことを示している。

れた。また離調を正 (+280 MHz) にとると、レーザー光強度がすべてほぼ等しい条件下でハニカム構造をもつパターンが得られた。このような波長オーダーの周期をもつハニカム構造はフォトニックバンド結晶として注目されている構造であり、本手法はその作製への応用も期待されている。

また、光の偏光を制御して生成される空間強度分布から異なる周期の構造物を作製する技術も報告されている²⁰⁾。2次元光マスクを形成する2組の直交したレーザービームペ

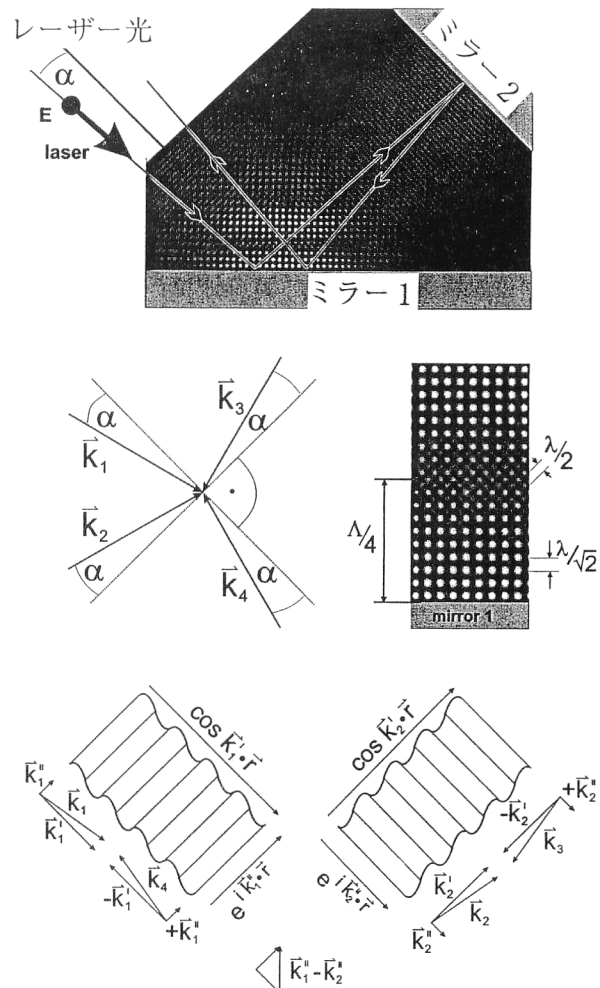


図5 超格子構造の作製概念図。ミラー1, 2のあいだで反射される光ビームによって光マスクが形成されるが、角度 α だけ対称性を破って入射させる。

アについて、偏光を互いに直交するようにとると、2組の独立した光定在波が形成されるので基板上で周期 $\lambda/2$ のドット構造を作製することができる。ところが、偏光がすべて基板に対して垂直な方向に設定すれば、4本の光の干渉パターンによって光マスクが形成されるため、周期は $\lambda/\sqrt{2}$ へ変化する。さらに図5のような配置で、光の入射方向を微小角 α だけ対称性を崩すと、上記の両方の効果を組み合わせると超格子構造を作製することができる。図5の配置で、相対位相因子

$$\exp(i(\vec{k}_1'' - \vec{k}_2'') \cdot \vec{r}) \quad (3)$$

を生じさせることができ、

$$|\vec{k}_1''| = |\vec{k}_2''| = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \sin\alpha \quad (4)$$

を考慮すると、この因子に由来する超格子周期として

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\sqrt{2}\sin\alpha} \quad (5)$$

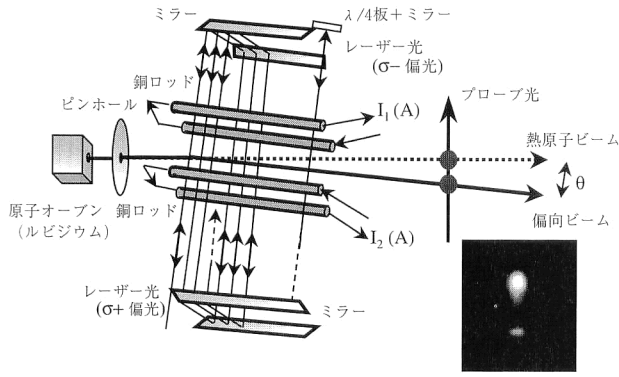


図6 1次元磁気光学トラップによるRbビームのガイド・偏向実験図とその結果。実験結果はプローブ光による原子のレーザー誘起蛍光をCCDカメラでモニターしたもの。下側の輝点が偏向ビーム。

を得る。図5中のミラー1からの距離 r に従って、 $r=0$ 付近では相対位相がゼロになるので周期 $\lambda/\sqrt{2}$ となり、 $r=\lambda/4$ で周期 $\lambda/2$ となる。そのあとは再び周期 $\lambda/\sqrt{2}$ を経て $\lambda/2$ へと変化していくが原子の堆積する場所は今までとは反転する。同じ基板上で微視的には $\lambda/2$ と $\lambda/\sqrt{2}$ の両方の周期が存在すると同時に、Crを対象とした実験で周期が $200\ \mu\text{m}$ の超格子構造がこの種の方法では初めて観測された。

今まで述べた実験では、原子源として熱原子ビームが通常用いられてきたために、原子構造物の分解能やコントラスト、また背景原子層の生成に関して問題点が残されている。これらの課題を克服して高性能な原子描画を実現するためには、制御された（純粋な）原子源の開発が不可欠であると考えられている。筆者らはそのためのスキームとして独自に1次元の磁気光学トラップ(MOT)を用いた原子ビームのガイド・偏向スキームを提案し(図6)、実際にRb原子の速度・同位体選別された偏向ビームを取り出すことに成功した²¹⁾。このスキームは、光の散乱力によって原子を選別・ガイドするプロセスで原子線の横冷却を同時に施すことができ、広がり角1 mrad以下で十分指向性の高い高密度ビームを取り出すことを可能にした。また、四重極磁場生成用の電流値を変えて選別ビームの空間操作を可能にするなど、機能的にもすぐれている。筆者らはこの1次元MOTで得られた選別ビームを用いて原子チャネリング実験を行い、原子源の速度分布幅を狭めることによって、生成される原子パターンを細線化でき、チャネリング特性が向上することを実験的に明らかにした。

光の空間的強度変化を使わなくても、光の偏光を巧みに利用すれば、均一な光の場でも原子に力を及ぼしてその運動を制御することができる。偏光勾配冷却²²⁾を用いた方法がそれで、1996年にGuptaらにより原子描画への応用が

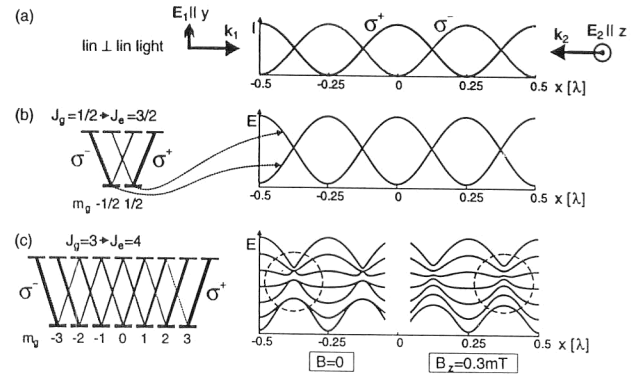


図7 偏光勾配冷却法を用いた原子の運動制御。(a) 光の場は2つの異なる(右回りか左回りか)円偏光の成分に分解されるが、原子の基底状態は磁気量子数によってエネルギー変移が異なる。(b) エネルギー極小点は $J_g=1/2 \rightarrow J_e=3/2$ の遷移をもつ原子の場合は $\lambda/4$ ごとに出てくることになる。(c) Crのような $J_g=3 \rightarrow J_e=4$ の遷移をもつ原子なら周期は $\lambda/8$ まで小さくなる。

示された²³⁾。この方法では $\lambda/2$ 以下の、今まで以上に周期の小さな構造物を作れる可能性がある。負に離調した互いに垂直な2つの直線偏光の光が交差しているときを考えると(図7)、空間的に変化する偏光状態(1/8波長ごとに直線偏光、右回り円偏光、直線偏光、左回り円偏光と変化する)と基底状態における磁気副準位のエネルギー変移の効果が組み合わさり、この光の中を動く原子は空間的に変化するエネルギー準位の坂を登っては光ポンピングによって励起状態を経由して最低エネルギー準位に落ちることを繰り返す。このとき原子が吸収するエネルギーよりも放出するエネルギーのほうが大きいので運動エネルギーを失い、原子は最終的にエネルギー極小点付近にガイドされ集められることになる。最も簡単な $J_g=1/2 \rightarrow J_e=3/2$ の遷移をもつ原子を使用した場合、この機構ではエネルギー極小点に相当する空間的周期は $\lambda/4$ になるので、この光の場をリソグラフィ用マスクとして用いれば、基板上に作製される構造物周期もそれに応じて狭くなることが期待できる。Cr原子は $J_g=3 \rightarrow J_e=4$ のエネルギー構造をもち、原子構造物の周期はさらに短くできて、 $\lambda/8$ にまで狭めることが物理的に可能であり、実際にその周期構造が観測された。このような方法は、従来の限界を超える微細な原子パターン生成方法としてきわめて有望である。

以上、原子ガイディング技術の観点から、最近の特徴ある成果について概観した。原子の精密操作に関しては、散乱力を利用した方法では自然放出に伴う運動量拡散が問題になるので、主に双極子力が使われることになる。双極子力を原子に対して有効に作用させるためには、通常、十分な強度の光源が必要である。多くの原子は $400\ \text{nm}$ 程度以

下の波長域に強いサイクリックな遷移をもつので、紫外域でこのような条件を満たす光源の開発が必須となる。筆者らのグループでは以前に外部共振器とモード同期レーザーを使った高効率波長変換法について報告したが²⁴⁾、今後シングルモード光でないこのような光源が原子操作技術において脚光を浴びる可能性がある。また、最近では市販の紫色半導体レーザーが外部共振器構造をとることによってレーザー冷却用光源として十分な性能を有するまでに改良できることが報告されている²⁵⁾。半導体レーザーは他のレーザー光源（コヒーレント光源）に比べて操作性やコストパフォーマンスの点で圧倒的にすぐれており、将来さまざまに高性能化されたうえでますますこの種の実験に多用されるであろう。

文 献

- 1) J. E. Bjorkholm, R. E. Freeman, A. Ashkin and D. B. Pearson: "Observation of focusing of neutral atoms by the dipole forces of resonance-radiation pressure," *Phys. Rev. Lett.*, **41** (1978) 1361-1364.
- 2) V. I. Balykin, V. S. Letokhov, A. I. Sidorov and Yu. B. Ovchinnikov: "Focusing of an atomic beam and imaging of atomic sources by means of a laser lens based on resonance-radiation pressure," *J. Mod. Opt.*, **35** (1988) 17-34.
- 3) V. I. Balykin and V. S. Letokhov: "The possibility of deep laser focusing of an atomic beam into the Å-region," *Opt. Commun.*, **64** (1987) 151-156.
- 4) J. Yin, Y. Zhu, W. Wang, Y. Wang and W. Jhe: "Optical potential for atom guidance in a dark hollow laser beam," *J. Opt. Soc. Am. B*, **15** (1998) 25-33.
- 5) J. Yin, Y. Zhu, W. Jhe and Z. Wang: "Atom guiding and cooling in a dark hollow laser beam," *Phys. Rev. A*, **58** (1998) 509-513.
- 6) J. Yin and Y. Zhu: "Doughnut-beam-induced Sisyphus cooling in atomic guiding and collimation," *J. Opt. Soc. Am. B*, **15** (1998) 2235-2239.
- 7) M. J. Snadden, A. S. Bell, R. B. M. Clarke, E. Riis and D. H. McIntyre: "Doughnut mode magneto-optical trap," *J. Opt. Soc. Am. B*, **14** (1997) 544-552.
- 8) Y. Song, D. Milam and W. T. Hill, III: "Long, narrow all-light atom guide," *Opt. Lett.*, **24** (1999) 1805-1807.
- 9) Yu. B. Ovchinnikov, I. Manek, A. I. Sidorov, G. Wasik and R. Grimm: "Gravito-optical atom trap based on a conical hollow beam," *Europhys. Lett.*, **43** (1998) 510-515.
- 10) R. Ozeri, L. Khaykovich, N. Friedman and N. Davidson: "Large-volume single-beam dark optical trap for atoms using binary phase elements," *J. Opt. Soc. Am. B*, **17** (2000) 1113-1116.
- 11) J. Durnin: "Exact solutions for nondiffracting beams. I. The scalar theory," *J. Opt. Soc. Am. B*, **4** (1987) 651-654.
- 12) J. Durnin, J. J. Miceli, Jr. and J. H. Eberly: "Diffraction-free beams," *Phys. Rev. Lett.*, **58** (1987) 1499-1501.
- 13) R. M. Herman and T. A. Wiggins: "Production and uses of diffractionless beams," *J. Opt. Soc. Am. A*, **8** (1991) 932-942.
- 14) J. Arlt, T. Hitomi and K. Dholakia: "Atom guiding along Laguerre-Gaussian and Bessel light beams," *Appl. Phys. B*, **71** (2000) 549-554.
- 15) G. Timp, R. E. Behringer, D. M. Tennant, J. E. Cunningham, M. Prentiss and K. K. Berggren: "Using light as a lens for submicron, neutral-atom lithography," *Phys. Rev. Lett.*, **69** (1992) 1636-1639.
- 16) J. J. McClelland, R. E. Scholten, E. C. Palm and R. J. Celotta: "Laser-focused atomic deposition," *Science*, **262** (1993) 877-880.
- 17) U. Drodofsky, J. Stuhler, B. Brezger, Th. Schulze, M. Drewsen, T. Pfau and J. Mlynek: "Nanometerscale lithography with chromium atoms using light forces," *Microelectron. Engin.*, **35** (1997) 285-288.
- 18) 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.
- 19) U. Drodofsky, J. Stuhler, Th. Schulze, M. Drewsen, B. Brezger, T. Pfau and J. Mlynek: "Hexagonal nanostructures generated by light masks for neutral atoms," *Appl. Phys. B*, **65** (1997) 755-759.
- 20) Th. Schulze, B. Brezger, R. Mertens, M. Pivk, T. Pfau and J. Mlynek: "Writing a superlattice with light forces," *Appl. Phys. B*, **70** (2000) 671-674.
- 21) R. Ohmukai, S. Urabe and M. Watanabe: "Atomic beam guide by a one-dimensional magneto-optical trap," *Appl. Phys. B*, **69** (1999) 123-128.
- 22) J. Dalibard and C. Cohen-Tannoudji: "Laser cooling below the Doppler-limit by polarization gradients: Simple theoretical models," *J. Opt. Soc. Am. B*, **6** (1989) 2023-2045.
- 23) R. Gupta, J. J. McClelland, P. Marte and R. J. Celotta: "Raman-induced avoided crossings in adiabatic optical potentials: Observation of $\lambda/8$ spatial frequency in the distribution of atoms," *Phys. Rev. Lett.*, **76** (1996) 4689-4692.
- 24) M. Watanabe, R. Ohmukai, K. Hayasaka, H. Imajo and S. Urabe: "High-power second-harmonic generation with picosecond and hundreds-of-picosecond pulses of a cw mode-locked Ti:sapphire laser," *Opt. Lett.*, **19** (1994) 637-639.
- 25) K. Hayasaka, S. Urabe and M. Watanabe: "Laser cooling of Ca^+ with an external-cavity ultraviolet diode laser," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39** (2000) L687-L689.

(2001年5月2日受理)