

实现冷原子或冷分子囚禁的双层光阱阵列

沐仁旺¹ 纪宪明¹ 印建平^{2*}

¹ 南通大学理学院, 江苏 南通 226007

² 华东师范大学物理系 精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062

摘要 提出了一种新颖的实现冷原子或冷分子囚禁的双层光阱方案,它由二元 π 相位板阵列和会聚透镜阵列所组成,用平面光波通过此光学系统时将在透镜焦平面两侧形成双层光阱。介绍了产生双层光阱的基本原理,分析了光阱光强分布、强度梯度等与光学系统参数间的关系,研究了双层光阱囚禁原子(或分子)的光学偶极势和自发散射速率(包括瑞利散射和拉曼散射)等。该方案不仅可用于多样品原子(或分子)的光学囚禁及全光型玻色-爱因斯坦凝聚(BEC),而且可用于制备新颖的双层 2D 光学晶格。

关键词 原子与分子物理; 原子分子囚禁; 双层光阱; 二元 π 相位板; 光学晶格

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092903.0822

Double-Layer Optical-Trap Arrays for Trapping Cold Atoms or Molecules

Mu Renwang¹ Ji Xianming¹ Yin Jianping^{2*}

¹ Science College, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226007, China

² State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, Department of Physics, East China Normal University, Shanghai 200062, China

Abstract A novel scheme of double-layer optical trap, which is composed of binary π -phase-plate arrays and focusing lens arrays, for trapping cold atoms or molecules was proposed. The double-layer optical trap is formed at the two sides of the focal plane when this optical system is illuminated by plane light wave. The principles of producing the double-layer optical trap were introduced and the relations between intensity distribution as well as intensity gradient and parameters of the optical system were analyzed in detail. Moreover, the optical dipole potential and spontaneous scattering speed, including Rayleigh scattering and Raman scattering, of the atoms or molecules trapped by double-layer optical trap were studied. The scheme can be used not only in trapping atoms or molecules of multiple samples and all optical Bose-Einstein condensation (BEC), but also in preparing novel double-layer 2D optical crystal lattice.

Key words atomic and molecular physics; atom or molecule trap; double-layer optical trap; binary π -phase plate; optical lattice

1 引言

近年来,集成原子光学及其原子芯片的理论与实验研究已取得了一系列丰硕的成果,研制成功了许多新颖的可集成化的具有表面微结构的原子光学元器件,采用红失谐或蓝失谐光束实现冷原子囚禁与波导的原子光学元器件得到了迅速的发展,出现了各种表面微光结构原子囚禁与波导阵列的方案。

2001年,Ertmer小组提出了用微球面和微柱面透镜阵列聚集红失谐高斯光束,以构成冷原子微光阱、导引原子的光学波导阵列以及阱与波导互连网络的方案,实现了⁸⁷Rb冷原子的一维(1D)和二维(2D)表面光学囚禁阵列^[1];2002年,该小组又采用交叉微柱面透镜阵列实现了 Mach-Zehnder 干涉仪型的 2D 光波导阵列和 X 型光波导原子分束器^[2,3]。由

收稿日期: 2008-05-20; **收到修改稿日期**: 2008-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(10434060,10674047,60571055)、江苏省自然科学基金(BK2008183)、华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室开放课题基金、科技部重大研究计划项目子课题(2006CB921604)、上海市科委基础研究重点项目(07JC14017)、教育部长江学者与创新团队基金项目和上海市重点学科专项基金(B408)资助课题

作者简介: 沐仁旺(1959-),男,教授,主要从事信息光学、原子分子光学等方面的研究。E-mail: murw@ntu.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: jpyin@phy.ecnu.edu.cn

于集成原子光学及原子芯片不仅可用于介观物理学中一些基本物理问题的研究,而且在量子计算和量子信息处理等领域中有着重要的应用价值^[4~9],如:中性原子团中单个原子(qubit)量子编码的实现和快速量子门的形成^[10,11];通过腔内 QED 效应实现原子纠缠^[12]或利用冷原子操控在原子芯片表面实现多原子纠缠的量子门^[13]等,因此,全光型表面微结构集成原子光学及其原子芯片将成为一个新的重要的研究方向,有着重要的学术价值和广阔的应用前景。

在国内,2002 年以来我们小组提出了用微光学元件实现蓝失谐表面中空光阱冷原子囚禁、空心光管实现冷原子表面光波导、表面微型空心光阱及波导阵列等方案^[14~17]以及红失谐表面原子分束器、双光阱阵列及光学晶格、Dammann 光栅产生光阱阵列等方案^[18~23]。到目前为止,人们所提出的光学晶格还仅仅是在焦平面上的 1D 或 2D 平面(单层)光阱阵列,而用于冷原子光学囚禁的新颖 3D 光学晶格还未见到报道。本文提出了一种新颖的实现冷原子(或冷分子)囚禁的双层光阱方案,它由二元 π 相位板阵列及相应的会聚透镜阵列所组成,当一平面光波通过此光学系统时将在透镜焦平面两侧形成双层光阱。该方案不仅可用于多样品原子(或分子)的光学囚禁及全光型玻色-爱因斯坦凝聚(BEC)的实现,而且可用于制备新颖的双层 2D 光学晶格,同时也向 3D 光学晶格的实现迈进了一步。

2 双层光阱方案

1D 和 2D 双层光阱新方案如图 1 所示,图 1(a)表示二元相位板的一个单元,中心半径为 r_0 的区域被遮挡,位相为 0 和 π 的圆环面积相等;图 1(b)为集成光学元件及其形成光阱的光路示意图,集成光学元件是在透明基片的下表面刻制二元 π 相位板阵列[图 1(c)],在基片上表面对应位置制作微透镜阵列[图 1(d)]。当一束平面光波垂直照射到这样的光学系统上时,就会形成一个双层的 1D 或 2D 光阱阵列[图 1(e)、(f)]。在 1D 或 2D 阵列中,一个二元相位板单元和一个微透镜相对应,构成集成光学元件的一个单元,因此,可从某单元的成像原理来分析产生双光阱的机理,从而揭示双层光阱阵列的产生原理。某单元的二元 π 相位板的中心区域被遮挡,外围是两个面积相等的同心圆环,两圆环的光学厚度之差为 $\lambda/2$ (λ 为入射光波长),分别形成 0 和 π 的位相。二元 π 相位板相当于一个位相型菲涅耳透镜,它具有虚、实两个焦点;当一束平面光波照射时,通过菲涅耳透镜的衍射光波由两部分组成,一部分是顶点在虚焦点的发散光束,另一部分是顶点在实焦点的会聚光束;对于透镜来说,菲涅耳透镜的虚、实两个焦点相当于两个物点,根据成像规律,将在透镜焦点的两侧形成它们的像点,即光学双阱。此外,由于完全相消干涉,焦点上的光强为零。

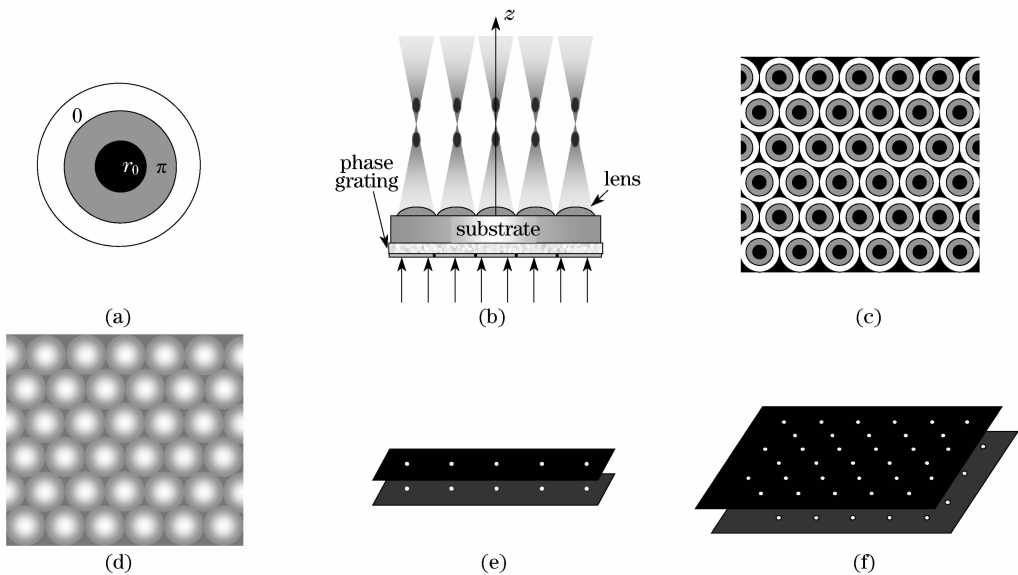


图 1 制备双层光阱阵列的原理性方案

(a) 单元相位板; (b) 光路图; (c) 相位板阵列; (d) 微透镜阵列; (e) 1D 双层光阱阵列; (f) 2D 双层光阱阵列

Fig. 1 Principle scheme for preparing double-layer optical trap arrays.

(a) Unitary phase plate; (b) light path; (c) phase-plate arrays; (d) micro lens arrays;

(e) 1D double-layer optical-trap arrays; (f) 2D double-layer optical-trap arrays

3 双层光阱阵列的光强分布

根据菲涅耳衍射理论,假设入射光波是波长为 λ 、振幅为 A 的理想平面波,透镜焦距为 f ,则在距离透镜 z 处,且垂直于光轴的任一平面上的光扰动分布为(略去常相位因子):

$$U(r, z) = \frac{A}{z\lambda} \int_0^{2\pi} \left[\int_{\rho_0}^{\rho_1} - \int_{\rho_1}^{\rho_2} \right] \exp \left[i \left(-\frac{kr\rho \cos \theta}{z} + \frac{k\rho^2}{2z} - \frac{k\rho^2}{2f} \right) \right] \rho d\rho d\theta. \quad (1)$$

相应的光强分布为 $I(r, z) = |U(r, z)|^2$ 。在研究中发现,在光轴上,透镜焦点两侧有两个光强最大值(光阱),焦点上光强为零;在焦平面上围绕焦点有多环衍射次最大,其中一级次最大光强较大,其它次最大光强很小;在过光阱中心垂直于光轴的平面上也有高级次级衍射。当保持两透光圆环的面积不变,改变中心遮挡部分的面积时,光轴上两个光阱的最大光强保持不变,而透镜焦平面的一级衍射光强减小,焦平面和光阱平面上的高级次级衍射和光强虽然有所增大,但仍然很小。设中心遮挡圆的半径为 $\rho_0 = \gamma t$ (γ 为比例系数, t 为第一菲涅耳半波带半径),则在焦平面上,一、二、三级衍射次最大光强值随中心遮挡圆半径 ρ_0 的变化关系分别如图 2 中虚线 b, c, d 所示,光阱平面上次级衍射最大光强随 ρ_0 的变化关系如图 2 中实线 a 所示。综合考虑上述两个因素,选择中心遮挡圆半径 $\rho_0 = 0.9t$ 时,次级衍射最大光强小于光阱最大光强的十分之一。

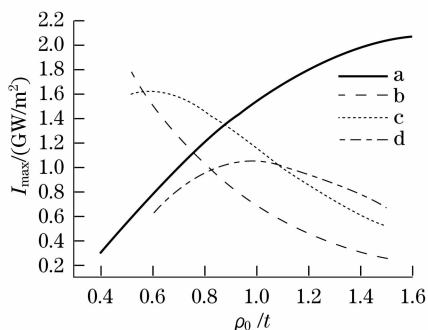


图 2 次级衍射光强最大值随中心遮挡圆半径的变化关系

Fig. 2 Dependence of the secondary diffraction order maximum intensity on radius of central hiding circle

根据以上的讨论,在(1)式中取 $\rho_0 = 0.9t$, $\rho_1 = \sqrt{1.81t}$, $\rho_2 = \sqrt{2.81t}$,通过数值计算,发现两个光阱中心到焦点的距离为 $z_{f\max} = \pm 0.74\lambda/\beta^2$ (这里 $\beta = t/f$),其最大光强为

$$I_{\max} = 20.923 I_0 (t/\lambda)^2 \beta^2, \quad (2)$$

式中 $I_0 = A^2$ 是照明光波的光强,我们还得到了几个

表征光阱几何参数与 λ, β 之间的解析关系:

1) 两个光阱中心之间的距离

$$\Delta z_{\max} = 1.481\lambda/\beta^2; \quad (3)$$

2) 在半径 r 和光轴 z 方向上,光强为最大值 $1/e^2$ 的两点间距离(也即光阱的径向和轴向尺寸)分别为

$$\Delta r_{1/e^2} = 0.419(\lambda/\beta) \quad (4)$$

和

$$\Delta z_{1/e^2} = 1.249\lambda/\beta^2. \quad (5)$$

如果以光强值等于最大光强 $1/e^2$ 的点作为光阱的边界,并将每个光阱近似看作一个椭球,光阱囚禁体积为

$$\Delta V_{1/e^2} = 0.115\lambda^3/\beta^4, \quad (6)$$

而在 r 和 z 方向上,每个光阱的最大光强梯度分别为

$$|\partial I/\partial r|_{\max} = 119.26 I_0 (t^2/\lambda^3) \beta^3 \quad (7)$$

和

$$|\partial I/\partial z|_{\max} = 44.92 I_0 (t^2/\lambda^3) \beta^4. \quad (8)$$

由上述关系可以看出,只要适当选取光学系统参数 λ, t, f 及 I_0 ,即可得到所需要的轴向光阱。当 $t = 0.06$ mm, $f = 0.68$ mm, $\lambda = 1.06$ μ m 和 $I_0 = 10^7$ W/m² ($\beta = 0.088$, 照明每个透镜的功率 $P \approx 0.3$ W) 时,光阱的最大光强为 $I_{\max} = 5.22 \times 10^9$ W/m², $\Delta r_{1/e^2} = 0.005$ mm, $\Delta z_{1/e^2} = 0.17$ mm 相应的光阱囚禁体积为 0.197×10^{-4} mm³,在 r 和 z 方向上光阱的最大光强梯度分别为 2.45×10^{15} W/m³ 和 9.25×10^{14} W/m³。双层光阱的层间距为 $\Delta z_{\max} = 0.201$ mm,同层光阱间距离也为 0.201 mm。

4 双层光阱阵列的潜在应用

由于交流 Stark 效应,在红失谐光场中二能级原子(或分子)将受到光场偶极力的吸引作用,被吸引到光强最大。当失谐量 $\delta = \omega_1 - \omega_a \approx \omega_1$ 时,相互作用偶极势 $U_D(r)$ 的大小由下式给出^[24]:

$$U_D(\mathbf{r}) = -\frac{1}{2} \frac{\alpha_s}{[1 - (\omega_1/\omega_a)^2]} |E_{\text{rms}}|^2, \quad (9)$$

式中 $|E_{\text{rms}}|^2 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} I(\mathbf{r})$, $I(\mathbf{r})$ 为光场强度, α_s 是基态原子的标量极化率。对于⁸⁵Rb的 D_2 线, $\alpha_s = 5.3 \times 10^{-39}$ m²/J, $\omega_a = 2\pi \times 3.85 \times 10^{14}$ Hz,由(9)式计算得到本方案中光阱最大的光学偶极势为 1.67 mK,这远高于磁光阱中冷⁸⁵Rb的温度(~ 120 μ K)。

另一方面,当冷原子在红失谐光场中运动时,还将发生光子自发散射[包括瑞利(Rayleigh)散射和拉曼(Raman)散射],其自发散射速率为

$$S_{\text{sp}} = S_{\text{Rayleigh}} + S_{\text{Raman}}, \quad (10)$$

式中 S_{Rayleigh} 和 S_{Raman} 分别为 Rayleigh 和 Raman 散射速率, 分别由下式估算:

$$S_{\text{Rayleigh}} = 8\pi R_0^2 I(\mathbf{r}) \omega_l^3 / (3\hbar \omega_a^4), \quad (11)$$

$$S_{\text{Raman}} = 8/9 (\Delta_{fs} \omega_l / \omega_a^2)^2 \cdot S_{\text{Rayleigh}}, \quad (12)$$

式中 R_0 是经典电子半径 ($2.818 \times 10^{-15} \text{ m}$), Δ_{fs} 为精细结构分裂。对于 ^{85}Rb 的 D_2 线, $\Delta_{fs} = 2\pi \times 7.1 \times 10^{12} \text{ Hz}$, 光阱的 Rayleigh 散射速率为 0.54 s^{-1} , Raman 散射速率为 $0.88 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。因此, 我们提出的光阱阵列可构成晶格常数约为 0.2 mm 双层光学晶格, 每个光阱囚禁的原子数可达 $1.97 \times 10^8 \sim 1.0 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ 个 (通常实现原子 BEC 的密度范围为 $10^{13} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$)。

双层光阱方案也可以用来囚禁冷分子, 如果用波长 $\lambda = 1.08 \text{ }\mu\text{m}$, $I_0 = 3.0 \times 10^9 \text{ W/m}^2$ (功率为 $P = 90 \text{ W}$) 的激光^[25]照明, 计算得双光阱的最大光强为 $I_{\text{max}} = 1.57 \times 10^{12} \text{ W/m}^2$, 囚禁 NH_3 的光学势为 5.03 mK , 这远高于 Stark 减速后的冷 NH_3 分子的平动温度 ($\sim 250 \text{ }\mu\text{K}$)^[26]。显然, 提出的双层光阱方案, 无论用于囚禁冷原子还是冷分子, 都具有较高的光学偶极势及较低的自发散射速率, 完全可以用来收集并囚禁来自磁光阱的冷原子或来自 Stark 减速的冷分子, 以实现多原子(分子)样品的光学囚禁。

此外, 从(3)式还可以看出, 当采用多波长照明该光学系统时, 即可产生一种多层的纵向非周期的 3D 光学晶格。显然, 这样的光学晶格在研究 3D 光学势阱中冷原子的量子运动与非线性效应等基本物理问题时同样有着十分重要的应用。

5 结 论

本文提出了一种新颖的实现冷原子或冷分子囚禁的双层光阱方案, 介绍了光阱产生的基本原理, 研究了光阱的几何参数与光学系统参数的关系, 通过选择光学系统的参数 λ 、 β 及 I_0 , 即可得到所需的光阱。研究表明, 本方案所产生的 1D 及 2D 双层光阱, 具有较高的偶极势和较低的光子散射速率, 非常适宜于冷原子或冷分子的光学囚禁, 可用于构成新颖的双层光学晶格, 并向新颖 3D 光学晶格的制备迈进了一步, 因而在原子光学与分子光学等领域中有着广阔的应用前景。

参 考 文 献

1 Birkel G, Buchkremer F B J, Dumke *et al.*. Atom optics with microfabricated optical elements[J]. *Opt. Commun.*, 2001, **191**:

67~81

- 2 Dumke R, Volk M, Muther T *et al.*. Micro-optical realization of arrays of selectively addressable dipole traps: a scalable configuration for quantum computation with atomic qubits[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **89**(9): 097903-1~4
- 3 Dumke R, Muther T, Volk M *et al.*. Interferometer-type structures for guided atoms [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **89**(22): 220402-1~4
- 4 Brugger K, Calarco T, Cassettari D *et al.*. Nanofabricated atom optics: atom chips[J] *J. Mod. Opt.*, 2000, **47**(14/15): 2789~2809
- 5 Greiner M, Mandel O, Essling T *et al.*. Quantum phase transition from a superfluid to a mott insulator in a gas of ultracold atoms [J]. *Nature*, 2002, **415**: 39~44
- 6 Folman R, Kruger P, Schmiedmayer J *et al.*. Microscopic atom optics: from wires to an atom chip[J]. *Adv. At. Mol. Opt. Phys.*, 2002, **48**: 263~356
- 7 Pellizzari T, Gardiner S, Cirac J *et al.*. Decoherence, continuous observation, and quantum computing: a cavity QED model[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **75**: 3788~3791
- 8 Pellizzari, T. Quantum networking with optical fibres[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **79**: 5242~5245
- 9 Teruletin P, Hommelhoff P, Steinmetz T *et al.*. Coherence in Microchip Traps[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**: 203005-1~4
- 10 Lukin M D, Fleischhauer M, Cote R *et al.*. Dipole blockade and quantum information processing in mesoscopic atomic ensembles [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **87**: 037901-1~4
- 11 Jaksch D, Cirac J I, Zoller P *et al.*. Fast quantum gates for neutral atoms[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**: 2208~2211
- 12 Calarco T, Hinds E A, Jaksch D *et al.*. Quantum gates with neutral atoms: Controlling collisional interactions in time-dependent traps[J]. *Phys. Rev. A*, 2000, **61**: 022304-1~11
- 13 A. Serensen, L. M. Duan, J. I. Cirac *et al.*. Many-particle entanglement with Bose-Einstein condensates[J]. 2001, *Nature*, **409**: 63~66
- 14 Jianping Yin, Weijian Gao, Yifu Zhu. Generations of dark hollow laser beams and their applications[J]. *Prog. Opt.*, 2003, **45**: 119~204
- 15 Yin Jianping, Gao Weijian, Wang Haifeng *et al.*. Generations of dark hollow beams and their applications in laser cooling of atoms and all optical-type Bose-Einstein condensation. [J] *Chin. Phys.*, 2002, **11**(11): 1157~1169
- 16 Ji Xianmin, Mu Renwang, Yin Jianping. A novel array of surface hollow optical micro-traps [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(11): 5109~5115
纪宪明, 沐仁旺, 印建平. 一种新颖的表面空心微光阱阵列[J]. *物理学报*, 2005, **54**(11): 5109~5115
- 17 Ji Xianmin, Yin Jianping. Generation of one-dimensional array of focused hollow-beam pipes and Its surface microscopic waveguide for cold atoms or molecules [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2004, **21**(7): 1272~1275
- 18 Ji Xianmin, Yin Jianping. A novel beam-splitter for surface wave-guided atoms or molecules [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(10): 4659~4665
纪宪明, 印建平. 一种新颖的表面光波导型原子(或分子)分束器[J]. *物理学报*, 2005, **54**(10): 4659~4665
- 19 Hu Jianjun, Yin Jianping. Double-well magnetic surface microtraps for cold atoms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(7): 769~776
胡建军, 印建平. 冷原子的双阱微磁表面囚禁[J]. *光学学报*, 2003, **23**(7): 769~776
- 20 Hu Jianjun, Yin Jianping. Double-well surface magneto-optical trap for neutral atoms and its potential applications [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(3): 412~418
胡建军, 印建平. 中性原子的表面双磁光阱及其应用[J]. *光学学*

- 报, 2005, **25**(3): 412~418
- 21 Mu Renwang, Li Yali, Ji Xianmin *et al.*. Generation of controllable double-well optical trap for cold atoms (molecules) and its experimental studies[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(12): 6333~6341
沐仁旺, 李雅丽, 纪宪明等. 实现冷原子(分子)囚禁的可控制光学双阱的产生及其实验研究[J]. *物理学报*, 2006, **55**(12): 6333~6341
- 22 Lu Junfa, Ji Xianming, Zhou Qi *et al.*. A novel controllable four-well optical trap for cold atoms or molecules and Its two-dimensional optical lattices [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 211~218
陆俊发, 纪宪明, 周琦等. 一种新颖的实现冷原子或冷分子囚禁的可控制光学四阱及其二维光学晶格[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 211~218
- 23 Ji Xianmin, Lu Junfa, Mu Renwang *et al.*. Array of micro-optical traps for cold atoms or cold molecules using a Damman grating[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(7): 3396~3402
纪宪明, 陆俊发, 沐仁旺等. 采用 Damman 光栅实现冷原子或冷分子囚禁的光阱阵列[J]. *物理学报*, 2006, **55**(7): 3396~3402
- 24 Takekoshi T, Yeh J R, Knize R J *et al.*. Quasi - electrostatic trap for. neutral atoms[J]. *Opt. Commun.*, 1995, **114**: 421~424
- 25 J. Limpert, A. Liem, H. Zellmer *et al.*. 500 W continuous wave fibre laser with excellent beam quality [J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**: 645~647
- 26 Hendrick L, Bethlem, Floris M H *et al.*. Deceleration and trapping of ammonia using time-varying electric fields[J]. *Phys. Rev.*, 2002, **65**: 053416-1~20

《激光与光电子学进展》“光学制造”栏目征稿启事

《激光与光电子学进展》是中国科学院上海光学精密机械研究所主办的激光、光电子领域行业性期刊, 中国科技核心期刊。该刊 1964 年创刊, 至今已出刊 500 余期, 旨在促进国内外学术交流, 沟通科研单位、生产部门与用户的联系。2009 年, 《激光与光电子学进展》将加大光学制造方向的报道力度, 深入研讨光学制造的技术发展及其在工业、科研各方面的应用。主要涉及方向有光学元器件、光学仪器、光学加工、光学设计、光学材料、光学薄膜、光学检测等领域。

欢迎相关的科研、技术、市场人员根据我们栏目内容定位, 撰写或向我们推荐涉及上述领域的优秀技术论文。来稿不收取审稿费和版面费, 一经录用将优先发表并支付丰厚稿酬。

• 本栏目基本要求:

- 1) 稿件内容应为光学制造领域的最新进展、研究动态、科研和新品开发成果等方面;
- 2) 文章要求内容新颖、论点正确、论据充分、数据可靠、文理通顺;
- 3) 技术文章字数一般为 5000 字左右; 综述文章字数最多不超过 10000 字, 且第一作者需为副教授及以上职称。

• 投稿方式: 通过网上投稿系统 (<http://www.opticsjournal.net/lop.htm>) 直接上传稿件(主题标明“光学制造”投稿), 也可以直接将稿件 word 版发至邮箱: dingjie@siom.ac.cn(主题标明“光学制造”投稿), 如有问题欢迎垂询 021-69918198 与栏目编辑丁洁联系。

《激光与光电子学进展》编辑部