

原子漏斗及其应用*

代萌 印建平[†]

(华东师范大学物理系 光谱学与波谱学教育部重点实验室 上海 200062)

摘要 文章简单介绍了磁、光原子漏斗的基本原理,详细综述了各种原子漏斗方案及其实验结果.这些漏斗方案主要包括采用红失谐高斯光束、蓝失谐消逝波光场和空心光束串联而成的光学原子漏斗,采用载流导线的静磁原子漏斗以及采用磁光凝胶构成的磁光原子漏斗.文章最后还简单介绍了原子漏斗在原子光学领域中的潜在应用.

关键词 原子漏斗,原子光学,原子光学器件

Atom funnels and their applications

DAI Meng YIN Jian-Ping[†]

(Key Laboratory for Optical and Magnetic Resonance Spectroscopy, Department of Physics, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract The basic principles of magnetic and optical atom funnels are introduced and the schemes and experimental results of various funnels are reviewed in some detail. These include optical funnels using a focused red-detuned Gaussian beam, blue-detuned evanescent-light wave and blue-detuned hollow beam, magnetic funnels with current-carrying wires, and certain magneto-optical funnels using magneto-optical molasses techniques. Finally, some potential applications of these funnels in atom optics are briefly described.

Keywords atom funnel, atom optics, atom-optical device

1 引言

为了实现冷原子样品从毫米尺寸的磁光阱(或原子束)到亚毫米(甚至微米)尺寸的磁、光实验装置(原子光学器件)的有效装载,或利用磁光阱实现高亮度相干冷原子束的产生,人们需要一种用于收集并压缩冷原子的原子光学器件.这一器件的作用类似于日常生活中所用的漏斗,故称之为“原子漏斗”.

在原子光学实验中,人们可利用磁光阱来获得冷原子,但当它关闭时,被囚禁的冷原子将被释放并自由下落和扩散,不能形成实用的冷原子束,为此需要原子漏斗来收集磁光阱中的冷原子,从而产生一束高亮度的冷原子束.原子漏斗还可用于实现冷原子从磁光阱到微型磁、光波导的有效装载,从而实现冷原子的磁、光导引.此外,它还可用于实现中性原子的激光冷却与囚禁,也可用于原子喷泉中有效地

收集上抛后下落的冷原子团,从而大大提高信噪比及其频率稳定度.因此,原子漏斗不仅可用于产生一束发散角小、速度宽度窄、亮度高的冷原子束,而且还可用于超高分辨光谱学、量子频标和低能原子碰撞等基础物理问题研究以及原子导引、原子全息和原子光刻等原子光学实验研究.

近年来,人们提出并实验研究了多种原子漏斗方案.早在1990年,Chu等人首先提出并实验研究了利用二维磁光阱产生冷原子束的原子漏斗方案^[1],获得了温度为 $200\mu\text{K}$ 、密度为 10^8 原子/ cm^3 的冷Na原子束.同年,Ertmer等人设计了一种采用塞曼减速器和二维磁光阱技术的原子漏斗方案^[2],将约3mm直径的初始原子束压缩为 $43\mu\text{m}$ 直径的

* 国家自然科学基金(批准号:10174050,10374029,10434060)和上海市重点学科以及教育部211专项基金资助项目

2004-11-16收到初稿 2004-12-10修回

[†] 通讯联系人. Email: jpyin@phy.ecnu.edu.cn

冷 Na 原子束. 随后, 他们通过改进实验装置^[3,4], 得到了温度约为 11.8 μK、密度约为 10⁸ 原子/cm³ 的冷原子束^[3,4]. 1994 年, Ye 等人提出一种采用纵向聚焦四极磁场构成的二维磁光阱技术的原子漏斗方案^[5], 获得了直径为 200 μm、密度为 3 × 10⁹ 原子/cm⁻³ 的冷 Cs 原子束^[5]. 1997 年, Ito 等人提出了采用蓝失谐消逝波光场的原子漏斗方案, 理论研究表明, 该漏斗具有 50% 的收集效率^[6]. 1998 年, 印建平等人提出一种采用中空光纤与空心光束串联而成的原子漏斗方案, 其收集效率可达到 98%^[7]. 最近, 为了实现冷原子的微磁波导, 特别是在原子芯片表面上的磁波导, 人们相继提出了各种采用载流导线或载流导体构成的静磁原子漏斗方案^[8,9]. 由于原子漏斗在原子光学实验中有着十分重要的应用, 本文将就几种典型的原子漏斗方案、实验结果及其最新进展作一系统综述, 并就原子漏斗的应用作一简单介绍.

2 原子漏斗的工作原理

冷原子在磁、光漏斗中受到的相互作用势(偶极作用力)类似于它在磁、光导引中受到的相互作用势, 其工作原理可分别简述如下:

2.1 光学原子漏斗的工作原理

由于交流斯塔克效应, 当一个二能级原子在非均匀激光场中运动时, 将受到光场的偶极力作用, 其相互作用势为^[10]

$$U(\mathbf{r}) = \frac{\hbar\delta}{2} \ln \left[1 + \frac{I(\mathbf{r})/I_s}{1 + 4(\delta/\Gamma)^2} \right], \quad (1)$$

式中 $I(\mathbf{r})$ 和 I_s 分别为激光强度分布和原子的饱和光强, Γ 为原子从激发态到基态的自发跃迁速率, $\delta = \omega - \omega_0 - kv_z$ 表示激光频率相对于原子共振频率的失谐量, 其中包含了多普勒频移 kv_z , 这里 k 为激光波矢. 当光场为红失谐 ($\delta < 0$) 时, 作用势为吸引势, 原子被吸引到光强最大处; 反之原子则被推向光强最小处. 因此, 采用红失谐的聚焦高斯光束和蓝失谐的会聚消逝波光场或聚焦空心光束的偶极作用力, 即可实现原子的会聚导引, 从而构成各种光学原子漏斗.

2.2 静磁原子漏斗的工作原理

类似地, 由于塞曼效应, 当一个中性原子在一个非均匀磁场中绝热运动时, 将受到如下的磁偶极相互作用势^[11]:

$$U(\mathbf{r}) = -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B}(\mathbf{r}) = -g_F \mu_B m_F B(\mathbf{r}), \quad (2)$$

式中 m_F 为原子的总自旋在磁场方向上的投影(即

磁量子数), g_F 为朗德因子, μ_B 为玻尔磁子, $B(\mathbf{r})$ 为磁场分布. 如果原子的磁偶极距平行于磁场, 则相互作用势为吸引势, 原子将被吸引到磁场强度的最大处; 反之, 则作用势为排斥势, 原子将被排斥到场强最弱处. 因此利用聚焦的空心管状磁场分布即可实现冷原子束的会聚导引, 从而构成各种静磁原子漏斗.

此外, 利用二维 Molasses 光束和聚焦空心磁管组成的二维磁光阱技术, 即可构成各种磁光原子漏斗方案^[1-5].

3 原子漏斗方案及其实验结果

3.1 光学原子漏斗

3.1.1 采用红失谐聚焦高斯光束的原子漏斗

1995 年, Cornell 小组采用聚焦的红失谐高斯光束作为原子漏斗, 实现了室温蒸气室中铷原子的收集、压缩与导引, 其高斯光束漏斗如图 1 所示^[12].

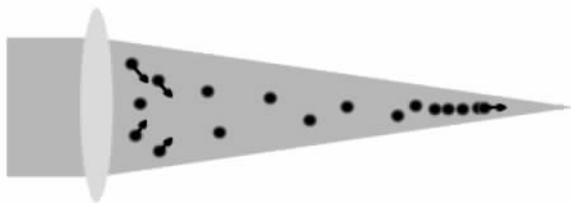


图 1 采用红失谐聚焦高斯光束的原子漏斗

在实验中, 一束红失谐的钛宝石高斯激光经过透镜聚焦后通过一个低真空(10⁻⁶ Torr, 1 Torr = 1.33 × 10² Pa) 的铷原子蒸气室而进入几十微米直径的中空光纤, 在光纤的中空区, 激发高斯模式. 根据交流斯塔克效应, 处于聚焦高斯光束中的铷原子一方面受到指向光束中心的横向偶极力的作用, 另一方面受到指向光束焦点的轴向偶极力的作用, 这样, 凡是进入聚焦高斯光束的冷原子将被吸引至光束中心, 并沿着光束聚焦方向(也即传播方向)被导引入中空光纤. 显然, 这里的红失谐聚焦高斯光束起到了收集、聚焦和导引原子的作用, 也即构成了一个光学原子漏斗.

3.1.2 采用蓝失谐空心光束的原子漏斗

空心光束指的是中心强度为零的环状光束, 通常产生空心光束的方法有几何光学法、横模选择法、光学全息法、计算全息法和中空光纤法等^[10]. 所谓中空光纤法^[13], 即当一束高斯光束聚焦后入射到中空光纤的纤芯时, 选择激发出光强呈环状分布的 LP₀₁ 模式, 当这一模式传播至光纤的输出端时, 将由

于衍射产生一束发散的 LP_{01} 模输出空心光束. 当该空心光束为蓝失谐时, 将可用于冷原子的收集、聚焦与激光导引, 从而构成一新颖的光学原子漏斗^[14].

1998年, 印建平等人提出了一种中空光纤和发散的蓝失谐空心光束串联而成的原子漏斗方案, 原理性实验装置如图2所示^[7]. 在图2中, 一段几毫米长的中空光纤的一端首先被切割成 45° 并抛光; 然后, 将一束蓝失谐的高斯光束经透镜耦合进入纤芯, 在斜面上反射后, 选择激发 LP_{01} 模, 在输出端衍射后产生一束发散的空心光束. 因此, 本方案用于构成原子漏斗的光场由一发散的蓝失谐空心光束和一中空光纤内的蓝失谐空心消逝波光场串联而成. 这样当冷原子从发散的空心光束一端输入时, 发散的蓝失谐空心光束起到冷原子的收集、聚焦和导引作用, 而消逝波光场起到导引和准直作用. 类似地, 由于光纤输出端附近的空心光束和光纤内的消逝波光场均具有非常高的强度梯度, 故当引入一附加的弱抽运光束时, 该漏斗还具有对导引原子的 Sisyphus 冷却效应. 理论研究表明, 该方案的原子漏斗效率可达到 95%. 显然, 这样的原子漏斗在超高分辨光谱学、原子光刻和原子光纤器件研制等方面有着重要的应用.

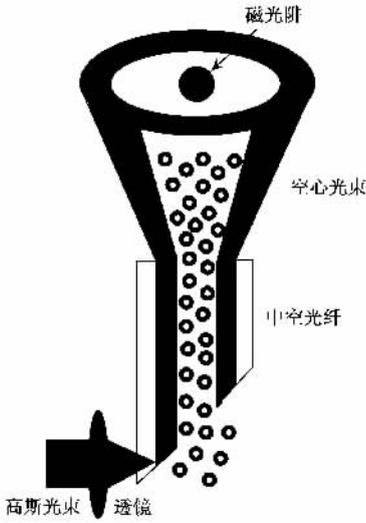


图2 采用蓝失谐空心光束的原子漏斗

此外, 还有其他的一些光学漏斗, 如 1997 年 Ito 等人提出的采用蓝失谐消逝波光场的原子漏斗^[6]等.

3.2 静磁原子漏斗

由于在上述光学原子漏斗中存在着或多或少的导引原子的自发光子散射效应, 特别是在红失谐的聚焦高斯光束原子漏斗中, 存在着较大的光子散射速率, 从而导致原子相干性的严重丢失. 为了彻底消

除原子的光子散射效应, 也为了解决磁导引中冷原子的有效装载问题, 近年来人们发展了各种静磁原子漏斗方案^[7,8]. 由于篇幅关系, 这里仅介绍一种采用载流导线的静磁原子漏斗方案.

2000年, Hinds 小组为了实现冷原子从毫米尺寸的磁光阱到亚毫米空心磁管的装载, 利用 4 根向外倾斜的载流导线所产生的锥型四极磁场构成了一个原子漏斗^[8], 其原子漏斗与导引的实验装置如图 3 所示. 他们在一根长度为 25mm 的硅管上开了 5 个直径为 $261\mu\text{m}$ 的圆柱形小孔, 其中一个小孔开在硅管的中心, 用于实现冷原子的静磁导引, 另外 4 个小孔对称地开在中心圆孔的四周, 距 x, y 轴均为 $522\mu\text{m}$, 用于固定导线. 在实验中, 他们将一根载流导线依次穿过四周的小孔, 并将硅管上方的导线部分安排为向外发散的倒金字塔形. 当导线通电时, 相邻两根导线中电流大小相等、方向相反, 在硅管中形成了一个四极磁场分布(即空心磁管), 而在硅管上方形成了一个向上发散的锥型四极磁场(Taper 型空心磁管), 处于弱场搜寻态的冷原子从磁光阱释放后, 在重力和磁偶极力的作用下将在磁漏斗中经多次来回反射, 最后将被会聚进入硅管中心的空心磁管. 显然, 起漏斗作用的是硅管上方的 4 根发散型载流导线.

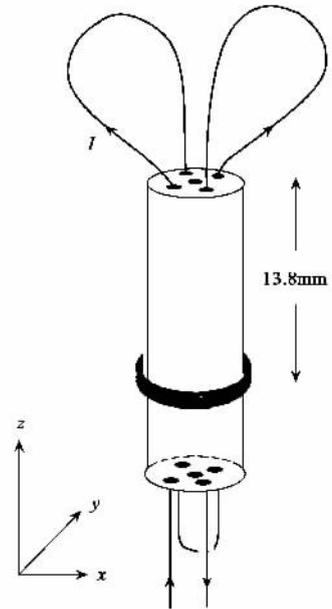


图3 采用载流导线的静磁原子漏斗

最近, 人们采用类似的具有 Taper 形截面的四根载流导线构成的静磁原子漏斗, 实现了冷原子的有效装载及其磁导引^[15-18]. 此外, 2002 年, 印建平

等人还提出了一种新颖的采用 V 型和 U 型载流导体的磁导引原子漏斗方案^[9,19],这些是易于蚀刻在原子芯片上的原子漏斗方案,在集成原子光学中有着广阔的应用前景.

3.3 磁光原子漏斗

典型的磁光原子漏斗方案主要有采用三维光学 Molasses 技术的磁光原子漏斗^[11]和采用二维磁光压缩技术的原子漏斗^[2-6,20]等,这里仅介绍前一种磁光原子漏斗.

1990 年,Chu 小组首先提出并实验研究了一种采用三维光学 Molasses 技术的磁光漏斗方案,实验方案如图 4 所示^[11].在图 4 中,一个回形针状的载流线圈产生了一个二维的四极磁场,二对圆偏振的椭圆高斯光束(二维 Molasses 光束)与四极磁场结合而构成二维磁光 Molasses,用于原子的横向冷却、囚禁与压缩;一对线偏振的光强相等但频率略为不同的一维 Molasses 光束构成了一维运动 Molasses 光束,用于冷却原子,并产生一慢速运动的冷原子束.在实验中,为保证冷原子束的输出,一方面,原子束与四极磁场轴线的水平夹角约为 7° ,在竖直方向上偏高 0.4 cm;另一方面,一对相向传输的二束 Molasses 光束的激光频率间保持一很小的差值,以构成一维运动光学凝胶,使冷原子获得一个沿着高频光束传播方向的大小为 $c\Delta\nu/2\nu$ 的初速度,以实现原子束的产生及其传输.实验获得了纵向速度为 270cm/s、温度约 200 μ K 和密度为 10^8 原子/cm³ 冷钠原子束,其亮度比入射时提高了 3 个量级,由于没有采用磁光压缩技术,故原子束的亮度提高不多.同时冷原子的收集效率不高,仅为 10% 左右.

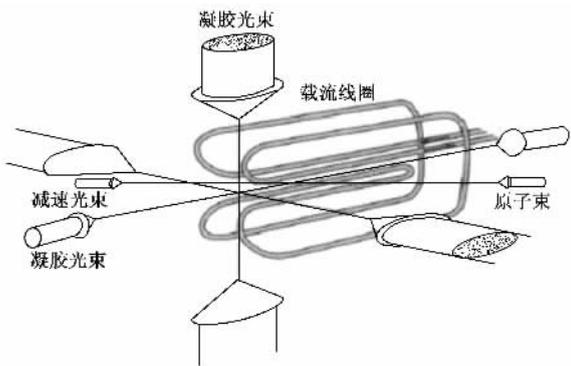


图 4 三维 Molasses 磁光原子漏斗

此外, Yu 等人设计并研究了一种采用二维磁光压缩技术的原子漏斗方案^[5], Ertmer 等人采用倾斜的二维磁光压缩技术对实验装置进行了改进,获得

了温度低至 11.5 μ K 的 Ne 原子束^[4].

4 原子漏斗的潜在应用

4.1 高亮度超冷原子束的实验产生

原子漏斗的最直接应用就是产生一束准直性好的高亮度超冷原子束^[1-5].例如,1990 年,Chu 小组采用三维光学 Molasses 技术的磁光漏斗方案,获得了温度约为 200 μ K 和密度为 10^8 原子/cm³ 的钠原子束^[11];1997 年, Ertmer 等人获得了接近光子反冲速度极限 ($2v_{rec}$)和密度为 5×10^8 原子/cm³ 的冷 Ne 原子束^[4];1998 年, Verdenbregt 等人的理论研究表明,采用优化的二维磁光压缩技术的原子漏斗方案,可产生一束原子通量达 2×10^{11} 原子/s 的冷 Na 原子束和通量为 8.5×10^{11} 原子/s 的冷 Rb 原子束^[21];2000 年, Riis 等人采用二维磁光漏斗方案获得了原子通量约为 7.3×10^8 原子/s 和温度为 25 μ K 的冷原子束^[22];2001 年, Jhe 小组采用由圆锥形空心反射镜构成的单束磁光原子漏斗方案,产生了一束温度为 380 μ K 和通量为 2.2×10^{10} 原子/s 的脉冲冷 Rb 原子束^[23];最近, Kohel 等人采用类似的单束磁光原子漏斗方案,获得了一束通量为 2.2×10^9 原子/s、发散角为 15mrad 和亮度为 1.2×10^{13} 原子/s/sr. 的强冷 Cs 原子束^[24].显然,如此高亮度的超冷相干原子束在原子喷泉钟及其射频频谱学^[25]、原子干涉仪^[26]、原子全息学^[27]和原子光刻术^[28]等方面都有着重要的应用.

4.2 中空光纤中冷原子的激光导引

原子导引是中性原子精密操控的核心技术之一,也是原子光学实验中必不可少的关键技术之一.目前原子导引技术可分为冷原子的激光导引和磁导引两种^[29,30].其中激光导引又可分为采用中空光纤和采用空心光束的激光导引^[29].尤其是在采用中空光纤的激光导引中,无论是利用红失谐高斯模式的激光导引,还是利用蓝失谐 Doughnut 模式的消逝波导引,均需要采用原子漏斗来实现冷原子从磁光阱到中空光纤的有效装载.1995 年, Cornell 小组采用一束聚焦的红失谐高斯光束原子漏斗,实现了 Rb 原子在中空光纤中的激光导引,实验装置如图 5 所示^[12].聚焦高斯光束在中空光纤中激发 EH_{11} 模并传播至探测室.由于 EH_{11} 模的直径为 22 μ m,小于光纤的中空直径为 40 μ m,故中空光纤内壁的范德瓦尔斯力和量子隧穿效应等导致的原子损失可以忽略不计.但由于自发辐射光子对原子的横向加热,使得该类激光导引的效率较低,仅为 2%—3%.

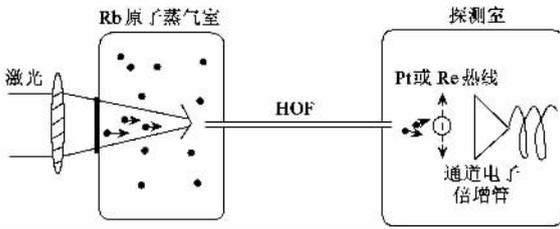


图5 采用红失谐高斯光束漏斗实现的原子激光导引

1996年,该小组又实现了中空光纤中冷原子的蓝失谐(LP₀₁模)消逝波导引^[31]。最近, Hayashi等人采用类似方案实现了Cs原子在中空光纤中的高斯模式导引,并研究了导引速率的光学势调制效应^[32]。此外,若采用蓝失谐空心光束的原子漏斗,则可实现中空光纤中LP₀₁模式的蓝失谐消逝波导引^[33]。

4.3 冷原子磁导引的实验研究

另一类原子导引方案是采用管状磁场分布的磁导引技术^[30]。2000年, Hinds小组采用4根载流导线构成的静磁漏斗方案,实现了冷原子从毫米尺寸的磁光阱到微型(~100μm)磁管的有效装载,实现了冷原子的静磁导引,并研究了冷原子在磁漏斗中的动力学反射^[8]。2001年, Teo等人采用类似的磁漏斗方案实现了冷原子的磁导引,实验装置如图6所示。研究结果表明,约为10⁵个冷Rb原子被有效装载进入磁导引管,相应的漏斗效率约为5%,而且入射原子束的直径被压缩了3个数量级^[15]。2002—2003年, Guery - Odelin小组采用Taper型静磁漏斗方案,实现了冷Rb原子的长距离(40cm)磁导引,相应的漏斗效率达到30%,磁导引的原子速率为3 × 10⁸原子/s^[16,17]。2004年, Guery - Odelin小组改进了磁漏斗和磁导引实验装置,实现了长达4.5m的磁导引^[18]。在实验中,他们首先通过磁漏斗获得了初始通量为7 × 10⁹原子/s和初始温度为400μK的入射原子束;其次,通过磁导引原子束的射频蒸发冷

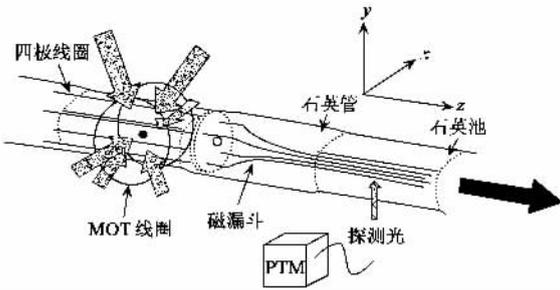


图6 采用静磁原子漏斗实现的冷原子磁导引

却和有效弹性碰撞(热平衡),研究了导引原子束相空间密度的进一步提高,并讨论了实现低维玻色-爱因斯坦凝聚(BEC)的可能性。

此外,原子漏斗在中性原子的激光偏振梯度冷却^[34]、消逝波冷却^[6]、空心光束冷却^[10,31,35]、磁光囚禁^[36]、原子束聚焦^[37]、喷泉原子钟^[29]与集成原子光学及其原子芯片^[38]等方面均有着广阔的应用前景。

参考文献

[1] Riis E *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1990 ,64(14):1658
 [2] Nellessen J *et al.* Opt. Commun. ,1990 ,78(3/4):300
 [3] Scholz A *et al.* Opt. Commun. ,1994 ,111 :155
 [4] Schiffer M *et al.* Opt. Commun. ,1997 ,134 :423
 [5] Yu J *et al.* Opt. Commun. ,1994 ,112 :136
 [6] Ito H *et al.* Appl. Phys. Lett. ,1997 ,70(19):2496
 [7] Yin J *et al.* Phys. Rev. ,1998 ,A57(3):1957
 [8] Key M *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2000 ,84(7):1371
 [9] Liu N *et al.* Eur. Phys. J. ,2002 ,D19 :137
 [10] Yin J *et al.* Prog. Opt. ,2003 ,45 :123
 [11] Schmiedmayer J. Phys. Rev. ,1995 ,A52(1):R13
 [12] Renn M J *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1995 ,75(18):3253
 [13] Yin J *et al.* Opt. Commun. ,1997 ,138 :287
 [14] Ni Y *et al.* J. Opt. B : Quantum Semiclass. Opt. ,2003 ,5 (3):300
 [15] Teo B K *et al.* Phys. Rev. ,2001 ,A63(3):031402 - 1
 [16] Cren P *et al.* Eur. Phys. J. ,2002 ,D20 :107
 [17] Roos C F *et al.* Laser Phys. ,2003 ,13(4):605
 [18] Lahaye T *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2004 ,93(9):093003 - 1
 [19] Liu N *et al.* Chin Phys. ,2003 ,12(9):955
 [20] Swanson T B *et al.* J. Opt. Soc. Am. ,1996 ,13(9):1833
 [21] Verdenbregt E J D *et al.* Opt. Commun. ,1998 ,147 :375
 [22] Chen H *et al.* Appl. Phys. ,2000 ,B70(5):665
 [23] Kim K H *et al.* Phys. Rev. ,2001 ,A64(1):013402 - 1
 [24] Kohel J. M *et al.* J. Opt. Soc. Am. ,2003 ,20(6):1161
 [25] Kasevich M A *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1989 ,63(6):612
 [26] McIntyre D H *et al.* SPIE ,1997 ,2995 :68
 [27] Fujita J *et al.* Nature ,1996 ,380 :191
 [28] McClelland J J *et al.* Science ,1993 ,262 :877
 [29] 胡建军等. 物理 ,2001 ,30(10):635[Hu J J *et al.* Wuli (Physics) 2001 30(10) 635(in Chinese)]
 [30] 刘南春等. 量子电子学报 ,2002 ,19(5):385[Liu N C *et al.* Chinese Journal of Quantum Electronics 2002 ,19(5) 385(in Chinese)]
 [31] Renn M J *et al.* Phys. Rev. ,1996 ,53(2):R648
 [32] Yin J *et al.* J. Appl. Phys. ,1998 ,85(5):2473
 [33] Hayashi S *et al.* Phys. Rev. ,2003 ,A68(5):053408 - 1
 [34] Kuppens S *et al.* Phys. Rev. ,1998 ,A58(4):3068
 [35] Morsch O *et al.* Opt. Commun. ,1998 ,148 :49
 [36] Williamson R S *et al.* Opt. Express ,1998 ,3(3):111
 [37] Schiffer M *et al.* Appl. Phys. ,1998 ,B67 :705
 [38] Folman R *et al.* Adv. At. Mol. Opt. Phys. ,2002 ,48 :263