

文章编号: 1001-3806(2009)04-0347-04

铬原子束 1 维多普勒激光准直分析

张宝武, 马艳, 李同保*
(同济大学 物理系, 上海 200092)

摘要: 为了研究预准直后铬原子束 1 维多普勒激光准直效果随着激光功率、激光失谐量和作用区域等各种参量变化的情况, 采用适当步长的 4 阶 Runge-Kutta 算法进行了理论分析, 得到了铬原子束 1 维多普勒激光准直效果与各种激光参量之间的变化关系。结果表明, 铬原子束经过离坩埚口 600mm、横向尺寸为 5mm 狭缝预准直后, 在激光功率为 20mW、激光失谐量为 -0.5Γ (Γ 为铬原子的自然线宽)、作用区域为 2 倍最小作用区域的情况下, 可以获得最好的激光准直效果。

关键词: 激光技术; 铬原子束; 激光冷却; 激光准直; 预准直狭缝

中图分类号: O413 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.04.004

Collimation of chromium atomic beam by means of 1-D Doppler laser

ZHANG Bao-wu, MA Yan, LI Tong-bao
(Department of Physics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to study how the collimation of chromium (Cr) atomic by means of 1-D Doppler laser varying with laser power, laser detuning and interaction length after pre-collimation, the correlation between the collimation and laser parameters was obtained after simulation with the fourth-order Runge-Kutta type algorithm at an adaptive step size. The results show that after pre-collimated by a slit in 5mm long, 600mm far away from the downstream, the best collimation results can be obtained at laser power of 20mW, laser detuning of -0.5Γ (Γ is the natural line-width of Cr), and twice of the minimum interaction zone.

Key words: laser technique; chromium atomic beam; laser cooling; laser collimation; pre-collimating slit

引言

准直原子束在高分辨率激光光谱、原子钟、原子碰撞、原子光刻等领域的研究中发挥着非常重要的作用。准直原子束的获得通常是采用刀口狭缝或小孔(横向尺寸约为 1mm)。这种方法不太理想的地方就是原子束准直度的提高是以原子通量的减小为代价的。原子激光冷却技术^[1-3]的出现为这个矛盾提供了一个非常好的解决方案,它能够在不减小原子通量的前提下提高原子束的准直度,而原来的刀口狭缝或小孔就成了其中的预准直环节。在提高原子束准直度方面,激光冷却的最简单应用方案是横向 1 维光学粘胶^[4-5],即垂直于原子束中轴具有一定失谐量的激光束穿过原子束以后,按原路返回形成 1 维驻波场。经过刀口狭缝或小孔预准直的原子束在通过这个驻波场时,由于原子

和光子之间的相互作用,其横向发散角会被大大地减小,这样,就会获得准直度较好的原子束。这方面的实验和理论研究已经非常详尽,但是文献中出现较多的是相关课题组的实验工作^[6-8],理论方面多是讨论到原子所受力,对于原子束的准直效果(横向位置分布或准直度)随着预准直狭缝横向尺寸和纵向位置、激光功率、激光失谐量、激光束的纵向展宽(作用区域)等各种参量变化的情况却涉及较少。

作者^[9]结合实验利用适当步长的 4 阶 Runge-Kutta 算法对横向尺寸为 5mm 的大尺寸预准直狭缝前提下铬原子束的 1 维多普勒激光准直实验中激光功率和作用区域的影响进行了研究。并从理论和实验上对横向尺寸为 5mm 的大尺寸预准直狭缝前提下激光功率和作用区域对铬(Cr)原子束的 1 维多普勒激光准直效果的影响进行了初步的研究^[9]。本文中,作者以这部分工作为基础,采用其中的分析方法对横向尺寸为 5mm 的狭缝预准直后铬原子束的 1 维多普勒激光冷却进行了理论分析。模拟了铬原子的运动轨迹,研究了铬原子束准直效果(以横向位置分布来表示)随着激光功率、激光失谐量、作用区域等各种参量变化的情况。

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2006BAF06B08)

作者简介:张宝武(1978-),男,博士研究生,研究方向为原子光刻技术。

* 通讯联系人。E-mail:tbli@mail.tongji.edu.cn

收稿日期:2008-06-12;收到修改稿日期:2008-08-12

1 实验布局

实验系统如图 1a 所示。在虚线所示的真空室中, 装有铬粉的坩埚被原子炉加热至 1650℃, 其中的铬原子将以约 960m/s 的纵向最快速率从直径为 1mm 的坩埚口喷出, 沿纵向(定义为 Oz 方向)传输, 在真空系统

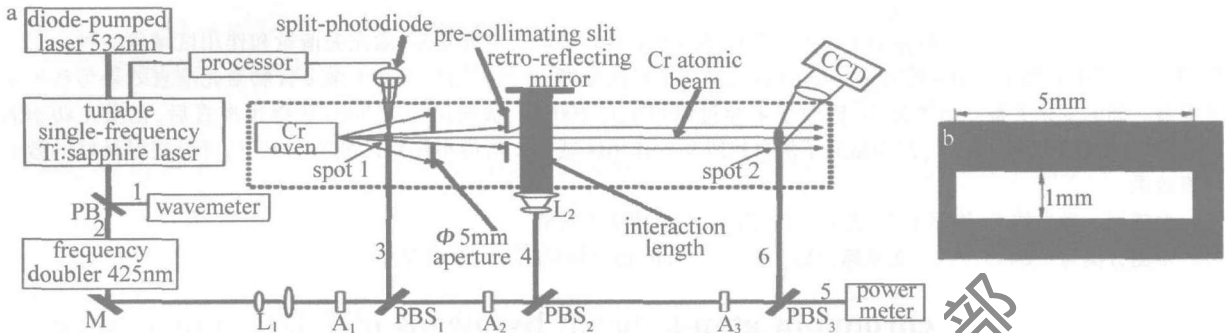


Fig. 1 Scheme of laser collimation of Cr atomic beam and pre-collimating slit

激光由偏振分束器 (polarizing beam, PB) 作用以后分成以 1,2 标记的两部分, 其中光束 1 直接入射到波长计中, 用来监测可调激光器的输出波长; 光束 2 入射到外腔倍频激光器中进行倍频产生 425.55nm 的激光。倍频器输出的激光经透镜组 L_1 整形后, 再经偏振分光镜器 (polarizing beam splitter, PBS) PBS_1 , PBS_2 和 PBS_3 分成以 3,4,5 和 6 标记的 4 部分: 光束 3 被导入到激光稳频室中激发铬原子产生稳频用的荧光斑点 spot 1, 用来稳频; 光束 4 被柱面镜组 L_2 扩束后, 在距坩埚口 600mm 处沿着预准直狭缝的后表面导入到激光准直室中, 垂直穿越原子束后, 再由高反镜反射形成沿 Ox 方向的 1 维光学粘胶, 用来准直铬原子束; 光束 5 入射到激光功率计中, 用来监视外腔倍频激光器的功率; 光束 6 在距坩埚口 1470mm 处被导入到激光探

中依次经过激光稳频室、激光准直室、激光探测室。在激光稳频室和激光准直室之间, 距坩埚口 440mm 处有 1 个直径为 5mm 的圆孔, 用于原子束中轴线的校准; 在准直室中距坩埚口 600mm 处有 1 个横向尺寸为 5mm 的预准直狭缝 (见图 1b) 对铬原子进行预准直。

其中的激光系统描述如下: 可调谐激光器输出的

激光由偏振分束器 (polarizing beam, PB) 作用以后分成以 1,2 标记的两部分, 其中光束 1 直接入射到波长计中, 用来监测可调激光器的输出波长; 光束 2 入射到外腔倍频激光器中进行倍频产生 425.55nm 的激光。倍频器输出的激光经透镜组 L_1 整形后, 再经偏振分光镜器 (polarizing beam splitter, PBS) PBS_1 , PBS_2 和 PBS_3 前的 A_1 , A_2 和 A_3 表示 $\lambda/2$ 波片, 而 M 是全反镜。

2 模拟结果及分析

图 1b 所示的预准直狭缝条件下, 铬原子束在进入准直激光场之前的横向速度范围为 ± 4.8 m/s。因此, 由参考文献 [10] 中的公式可知, 要将这个横向速度冷却至铬原子的多普勒极限 0.13m/s, 则激光束在 Oz 方向上的最小展宽 (作用区域) 应为 15.9mm。在这个区域内, 具有最大横向速度的铬原子与光子的最少作用次数为 260。其它相关的模拟参量如表 1 所示。

模拟过程中, 激光束为圆偏振光; 除了和激光有作

Table 1 Parameters for calculation

transition of Cr	$^7S_3 \rightarrow ^7P_4^0$	diameter of oven nozzle D_1 /mm	1
natural line-width Γ /MHz	$2\pi \times 5$	temperature of oven T /K	1923
laser wavelength λ /nm	425.55	the most probable longitudinal velocity $v_{mp}/(m \cdot s^{-1})$	960
laser beam waist in y direction w_y /mm	3	capture velocity $v_c/(m \cdot s^{-1})$	2.13
Initial range of transverse position x_0 /mm	$[-0.5, 0.5]$	initial range of transverse velocity $v_{x_0}/(m \cdot s^{-1})$	$[-6.55, 6.55]$
probe length/mm	1470		

用外, 铬原子之间没有相互作用。铬原子束初始的纵向速率分布满足麦克斯韦-玻尔兹曼速率分布, 横向速率分布满足高斯分布^[1]。

2.1 铬原子运动轨迹

为了清晰起见, 在图 2 中只给出了 1155 条准直前后铬原子运动的模拟轨迹。图中距坩埚口 $L_1 = 440$ mm 处是直径为 5mm 的圆孔, 预准直狭缝处在距坩埚口 $L_2 = 600$ mm 处。图中的每一条折线代表一个从坩埚口 $z = 0$ 处一个初始位置 $x_{i,0}$ 出发, 具有一定初始速度

(v_{i,x_0}, v_{i,y_0}) 的铬原子轨迹。 x 轴的中轴线代表横向速度为 0 的铬原子轨迹, 离中轴线越远的折线其初始横向速度绝对值越大。每一个铬原子先经过一个自由运动的距离 L_1 , 能够通过圆孔的继续自由运动至 L_2 , 被预准直狭缝作用。能够通过预准直狭缝的随即进入准直激光场, 在准直激光的作用下运动一个距离 L 。出了激光驻波场以后, 铬原子再次经过一个自由运动的距离 ($L_3 - L_2 - L$) 到达探测室, 给出终点的一个状态 (x_0, v_{x_0}, v_{y_0})。最后, 利用柱状图将所有的落点累积起

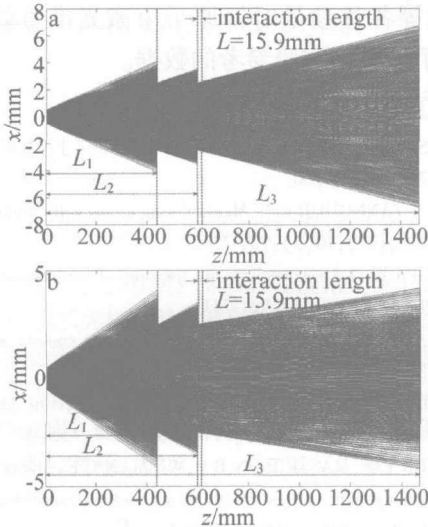


Fig. 2 Simulated atomic trajectories before and after laser collimation (laser intensity saturation parameter $s_0 = 2$)

来获得探测处铬原子束的横向位置分布,其中所跟踪的随机原子轨迹数为 173061 条。

对比图 2 中的两幅图可以看出,经过横向 1 维准直激光场作用后,坩埚口出射的铬原子运动轨迹都向着 $x = 0$,即铬原子束中轴线的方向偏折,但是偏折的程度不同。其中,初始横向速度的绝对值越大的原子,它的运动轨迹偏折的程度越小。

2.2 不同作用区域下,准直铬原子束的横向位置分布随激光功率的变化情况

图 3 中给出了不同作用区域下,准直铬原子束的横向位置分布随着激光功率的变化情况。

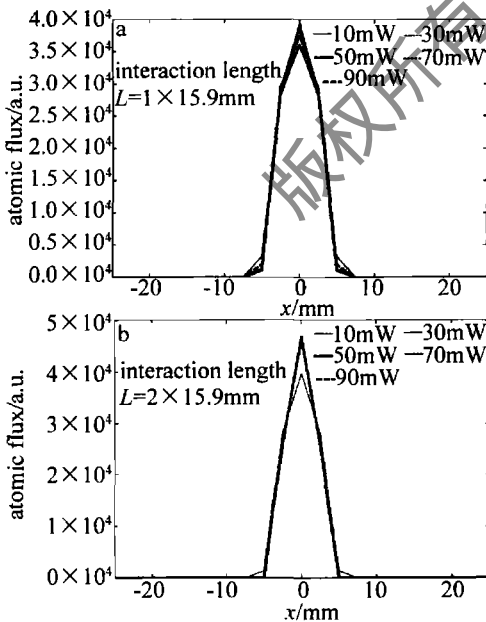


Fig. 3 Variation of transverse distribution of laser collimated atomic beam with laser power under different interaction length

图 3 显示,在一定作用区域内,准直铬原子束的横向位置分布随着激光功率的变化具有相似性:沿 x 方向的展宽(以半峰全宽(full width of half maximum,

FWHM)来表示),随激光功率的增大变化不是很明显,而峰值有一定的增加。为了更细致地观察这种变化情况,考察了不同作用区域内准直铬原子束的半峰全宽和中心峰值随着激光功率的变化情况,见图 4。

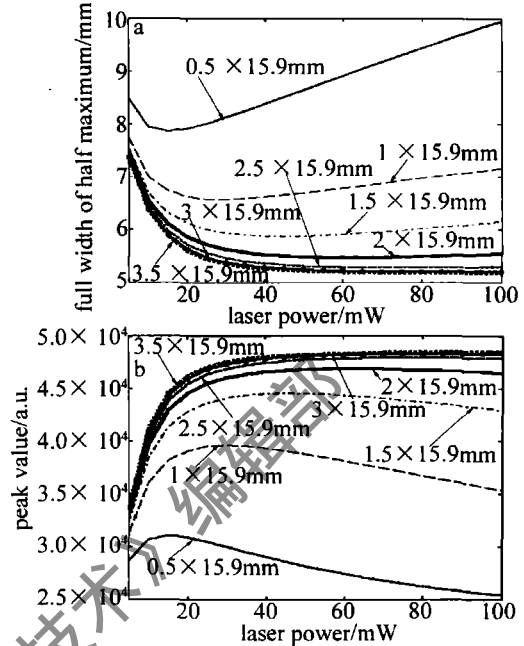


Fig. 4 Variation of FWHM and peak value of laser collimated atomic beam with laser power under different interaction length (laser detuning $\delta = -\Gamma$)

从图 4 中可以看出,当小于两倍的最小作用区域时,一定长度的作用区域下,准直铬原子束的半峰全宽随着激光功率的增加先减小后增大,其峰值却是随着激光功率的增加先增大后减小;当大于两倍的最小作用区域时,一定长度的作用区域下,准直铬原子束的半峰全宽随着激光功率的增加先减小后趋向于不变,其峰值却是随着激光功率的增加先增大后趋向于不变,这个变化的转折点约为 20mW。基于此,考察了准直铬原子束在 3 倍的最小作用区域和 60mW 的激光功率下横向分布(见图 5a)、半峰全宽和中心峰值分别与准直前的半峰全宽和中心峰值之比(见图 5b)随着激光频率失谐量的变化情况。

图 5a 显示,激光失谐量 δ 的不同,铬原子束的准直效果也不同:当红失谐时 $\delta < 0$,铬原子束会向着中轴处准直,并且在 $\delta = -0.5\Gamma$ 时峰值最大;当蓝失谐时,铬原子束会向着中轴两边分裂,并且随着蓝失谐的变大,分裂得越大。这在图 5b 的准直铬原子束的中心峰值和半峰全宽随着激光失谐量的变化曲线中显示得更明显:当红失谐时,以 $\delta = -0.5\Gamma$ 为界,当大于 -0.5Γ 时,准直铬原子束的半峰全宽随着失谐量变大而变小,中心峰值在变大;当小于 -0.5Γ 时,准直铬原子束的半峰全宽会随着失谐量的变大而变大,峰值在变小;当蓝失谐时,随着蓝失谐的变大,铬原子束被分

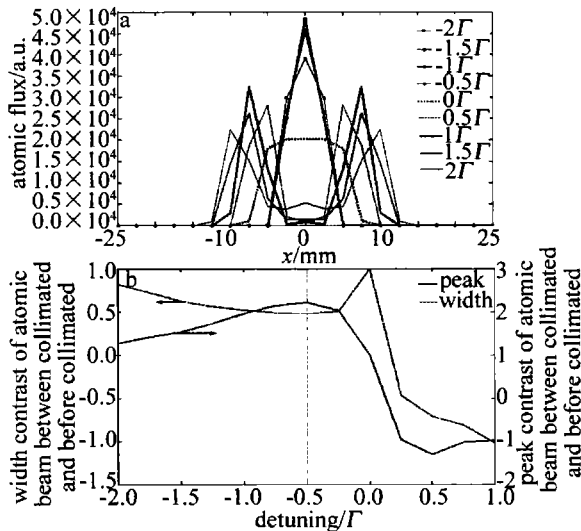


Fig. 5 Variation of transverse distribution and ratio of FWHM and peak value after laser collimation to that before collimation of laser collimated atomic beam with laser detuning (interaction length $L = 3 \times 15.9$ mm and laser power $P = 60$ mW)

裂得越大(半峰全宽和峰值都以负值表示)。

3 结论

运用数值方法对铬原子束在离坩埚口 600mm, 横向尺寸为 5mm 狭缝预准直情况下的 1 维多普勒激光准直进行了模拟分析。讨论了激光功率、激光失谐量、

(上接第 346 页)

到高阶次的散射光。因此,接收机的视场角越窄,整个传播过程就越接近于单次散射近似。不同视场角下各级散射对回波信号的贡献如图 5 所示,横坐标表示散射级,纵坐标表示对应散射级的回波信号在总回波信号中所占的比重。

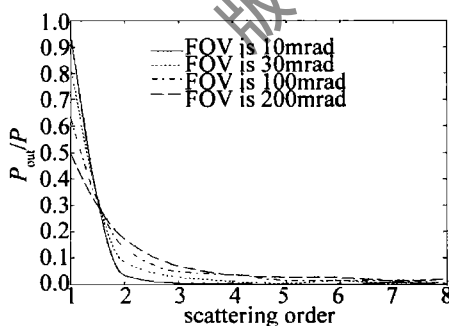


Fig. 5 Contribution of each order of scattering

3 结论

半解析蒙特卡罗方法在激光雷达回波信号的数值仿真中相对于其它蒙特卡罗方法具备更高的效率,大大节约了模拟时间。模拟了从近地到高空 5km 以及不同接收机视场角下的回波信号,可作为激光雷达研

作用区域等各种参量对铬原子束激光准直效果的影响,获得了一些供实验参考的数据。

参考文献

- [1] CHU S. The manipulation of neutral particles [J]. Rev Mod Phys, 1998, 70(3): 685-706.
- [2] COHEN-TANNOUDJI C N. Manipulating atoms with photons [J]. Rev Mod Phys, 1998, 70(3): 707-720.
- [3] PHILLIPS W D. Laser cooling and trapping of neutral atoms [J]. Rev Mod Phys, 1998, 70(3): 721-741.
- [4] METCALF H J, van der STRATEN P. Laser cooling and trapping [M]. New York: Springer, 1999: 85-92.
- [5] SCHOLTEN R E, GUPTA R, MCCLELLAND J J, et al. Laser collimation of a chromium beam [J]. Phys Rev, 1997, A55(2): 1331-1338.
- [6] TANNER C E, MASTERSON B P, WIEMAN C E. Atomic beam collimation using a laser diode with a self-locking power-buildup cavity [J]. Opt Lett, 1988, 13(5): 357-359.
- [7] SHEEHY B, SHANG S Q, van der STRATEN P, et al. Collimation of a rubidium beam below the Doppler limit [J]. Chemical Physics, 1990, 145(2): 317-325.
- [8] LETT P D, PHILLIPS W D, ROLSTON S L, et al. Optical molasses [J]. J O S A, 1989, B6(11): 2084-2107.
- [9] ZHANG B W, ZHANG W T, MA Y, et al. Collimation of chromium beam by one-dimensional Doppler laser with large collimating slit [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(9): 5486-5490 (in Chinese).
- [10] MA Y, ZHANG B W, ZHENG Ch L, et al. Experimental study of laser collimation of Cr beam [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(8): 4086-4090 (in Chinese).

制过程中选择系统参量的理论依据。

参考文献

- [1] ZACCANTI G, BRUSCAGLIONI P, DAMI M. Simple inexpensive method of measuring the temporal spreading of a light pulse propagating in a turbid medium [J]. Appl Opt, 1990, 29(27): 3938-3944.
- [2] PEI L Ch, WANG Zh Q. Monte Carlo method and its applications [M]. Beijing: Ocean Press, 1998: 3-33 (in Chinese).
- [3] TINET E, AVRILLIER S, TUALLE J M. Fast semianalytical Monte Carlo simulation for time-resolved light propagation in turbid media [J]. J O S A, 1996, A13(9): 1903-1915.
- [4] POOLE L R, VENABLE D D, CAMPBELL J W. Semianalytic Monte Carlo radiative transfer model for oceanographic lidar systems [J]. Appl Opt, 1981, 20(20): 3653-3656.
- [5] WU B Y, LI W, CHEN H B, et al. Practical arithmetic of atmospheric radiation and propagation [M]. Beijing: Meteorological Press, 1998: 73-128 (in Chinese).
- [6] PLATT C M R. Remote sounding of high clouds III: Monte Carlo calculations of multiple-scattered lidar returns [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1981, 38(1): 156-167.
- [7] McCLATCHEY R A, FENN R W, SELBY J E A, et al. Optical properties of the atmosphere [R]. Bedford, Massachusetts: Air Force Cambridge Researchlabs Labs, 1972: 15-26.
- [8] ZHONG Zh Q, ZHOU J, SUN D S, et al. The research of error analysis and simulation of aerosol detected by MPL [J]. Laser Technology, 2006, 30(3): 233-240 (in Chinese).
- [9] ISHIMARU A. Wave propagation and scattering in random media [M]. New York: Academic Press, 1986: 77-83.