

铷原子热蒸气中强非线性效应产生激光 模式图样的实验研究^{*}

郭 璐 卫 栋 陈海霞 熊德智 王鹏军 张 靖[†]

(山西大学光电研究所, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 太原 030006)

(2007 年 11 月 19 日收到; 2008 年 3 月 10 日收到修改稿)

研究了具有高斯横向分布的连续激光束单次通过铷原子蒸气后, 在近共振附近铷原子蒸气中, 由强的非线性克尔效应导致激光分裂成细丝的现象, 并且这些细丝的衍射图样在远场通过相干叠加, 可以形成具有规则结构的斑图模式. 实验上研究了输入光功率, 铷泡温度和抽运激光频率相对于⁸⁵Rb 原子 D_2 线的不同失谐位置等因素对斑图模式的影响. 由于铷原子的超精细能级结构, 在铷原子蒸气中同时存在与三阶非线性效应相关的四波混频现象, 通过扫描探测光的频率同时观察到具有斯托克斯和反斯托克斯光子的拉曼增益现象.

关键词: 铷原子蒸气, 克尔效应, 自聚焦, 斑图

PACC: 4265J, 4265C

1. 引 言

非线性导致坍塌到一个奇异点, 并伴随产生丰富的物理效应, 这种现象已在物理学中的很多领域如光学^[1], 流体力学^[2], 超冷原子^[3] 和等离子体^[4] 中观察到. 早在 1965 年^[5] 已经提出, 在非线性的克尔介质中, 光束功率如果大于临界功率 P_{cr} ^[6], 就会产生自聚焦和坍塌效应. 在光学系统中, 当一束具有高斯横向分布的激光或激光脉冲在非线性的介质中传输时, 由于束轴与边缘处场强的不同会造成折射率的非均匀分布. 激光的功率超过某一临界值时, 自聚焦效应占主导地位, 光束不能再维持它的空间分布, 振幅与位相(从噪声中)受到的微扰在非线性的效应和衍射效应的共同作用下会得到快速增长, 结果会使激光束分裂成许多细丝, 这些细丝在传播过程中彼此之间相干叠加, 在远场可以得到具有一定规则结构的光斑图样.

在非线性的光学系统中, 斑图模式的研究具有重要的意义. 一方面, 对斑图形成机理的研究可以使人们知道一个不规则的随机输入怎样产生出一个规则的模式输出, 从而采取措施避免光丝的形成, 或者对

光丝的形成进行控制与利用. 如在通讯与信息技术方面具有潜在应用价值的空间孤子, 可以直观地理解为衍射与自聚焦平衡的结果; 另一方面, 这些模式在图像处理与操控等方面有很大的利用价值, 如构造光学神经网络和联想记忆系统等. 此外, 飞秒激光在大气非线性传输时, 激光成丝已显现出其在激光雷达, 大气遥感等方面的应用前景.

目前, 人们已经在许多不同种类的非线性介质中观察到了斑图形成, 包括原子蒸气, 液晶材料, X_2 晶体, 有机液体, 玻璃, 半导体, 生物材料等介质^[7,8], 但是这些研究大多是在超短激光脉冲^[9] 和光反馈系统中进行的, 如采用反馈镜^[10-12], 谐振器^[13] 或波混频器^[14-17] 等作为反馈器件.

原子蒸气作为一种重要的非线性介质已被广泛研究, 它主要包含三阶非线性效应(克尔效应和四波混频). 早在 1970 年, Grischkowsky 就对激光单次穿过钾蒸气产生的自聚焦效应进行了研究^[18]; 1986 年, Golub 等人观察到激光束在通过原子蒸气的过程中, 会产生坍塌成丝现象, 并且这些丝化的光束呈圆锥形发射状^[19]; 1988 年, Shevy 等人提出了产生圆锥形发射状光束与四波混频有关^[20]; 1993 年, Chaupczak 等人通过调节穿过原子蒸气的光束强度,

^{*} 国家杰出青年基金(批准号: 10725416), 国家重点基础研究发展计划(973)项目(批准号: 2006CB921101), 国家自然科学基金(批准号: 60678029)和长江学者和创新团队发展计划资助的课题.

[†] 通讯联系人, E-mail: jzhang74@sxu.edu.cn, jzhang74@yahoo.com

可以精准地操控光束的坍塌^[21]; 1998 年, Dreischuh 等人通过实验证明了强激光束通过原子蒸气产生的圆锥形发散光束是由于拉曼共振的四波混频产生的^[22]; 2001 年, Andersen 等人使激光束通过铷蒸气, 得到了自聚焦形成的斑图模式^[23]; 2002 年 Bennink 等人使用连续染料激光器单次穿过钠蒸气介质对斑图模式进行了研究, 并通过克尔效应给出了很好的理论解释^[24]; 2005 年, Aumiler 等人使用脉冲激光束通过铯蒸气, 在远场观测到了斑图, 并分析指出产生该现象的主要原因是克尔效应^[25]. 本文使用一台高功率连续可调谐半导体激光器作为抽运光单次穿过铷原子蒸气来研究远场斑图模式的形成. 通过改变抽运激光的输入功率、相对于⁸⁵Rb 原子 D_2 线 $F=4 \rightarrow F'$ 跃迁频率的失谐和铷泡的温度, 观测远场斑图模式和光场强度噪声来研究铷原子蒸气成丝现象. 由于铷原子的超精细能级分裂, 在铷原子蒸气中同时存在与三阶非线性效应相关的四波混频现象, 用一台外腔反馈半导体激光器作为探测光, 通过扫描探测光的频率同时观察到具有斯托克斯和反斯托克斯光子的拉曼增益现象.

2. 实验装置

实验装置如图 1 所示, 高功率可调谐半导体激光器(TA100, Toptica)的输出功率是 400 mW, 作为抽运光. 输出光束首先经过隔离器(Isowave, I-80T-5L)

以防止光反馈, 分出一小部分做饱和吸收谱^[26-28], 大部分激光束经过 80 μm 的小孔进行空间模式滤波, 再用一个焦距为 630 mm 的透镜进行聚焦, 然后穿过铷原子玻璃气室. 实验中使用的铷泡长 50 mm, 直径 20 mm, 充有自然丰度的铷金属, 没有充缓冲气体. 铷泡放置在一个自制的紫铜管中, 使用电加热带对紫铜管进行加热, 并进行精确控温, 就可以使它中间的铷泡均匀受热. 自制的外腔光栅反馈半导体激光器(ECDL)作为探测光使用, 用来观察四波混频现象. 它输出的激光经过一个 20 μm 的小孔空间模式滤波和 630 mm 的透镜聚焦后, 通过一个格兰棱镜(GL)与抽运光以小角度耦合在一起, 这两束光在铷泡中尽量重合, 但在远场空间上完全分开. 两台激光器都可以连续扫描出完整的铷原子 D_2 线的饱和吸收线, 频率扫描范围在 10 GHz 以上. 探测光经过铷泡由探测器探测, 在示波器上标定主激光器频率相对于铷原子 D_2 线的不同失谐位置和观测拉曼吸收或增益. 在铷泡后面用一个普通的偏振分光棱镜(PBS), 把大部分抽运光反射出去, 只有一部分(约 1 mW)抽运光会透过 PBS 在远处的屏上成像, 用 CCD 相机观察屏上光斑的模式变化, 使用计算机进行图像记录. 另外, 用 $\lambda/2$ 波片和偏振分光棱镜分出 540 μW 的抽运光, 进入由 $\lambda/2$ 波片和偏振分光棱镜构成的 50/50 的分束器, 输出的两束光分别由两个宽带低噪声探测器探测, 输出的两路光电流信号经加减法器送入频谱分析仪, 记录激光的强度噪声谱^[29].

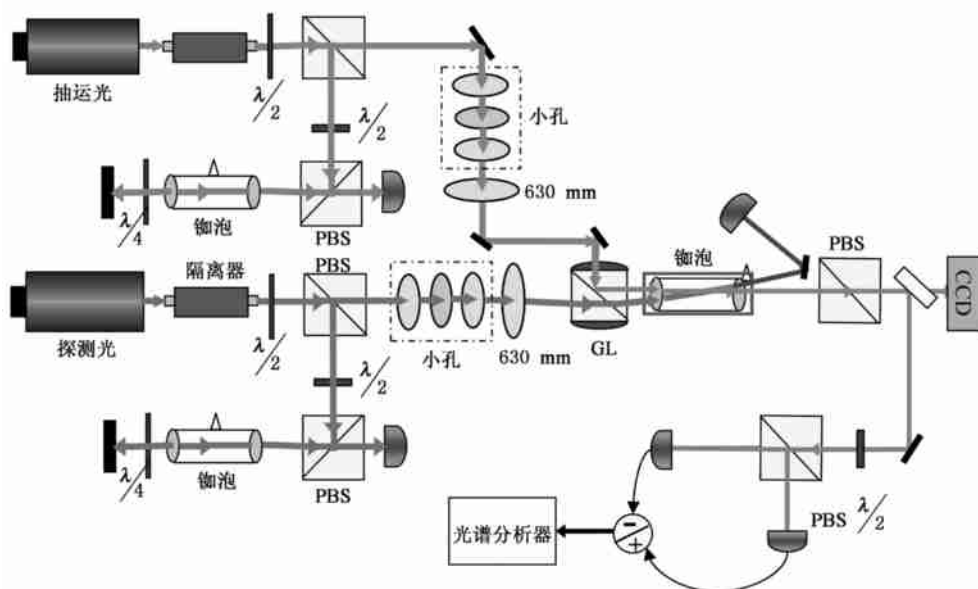


图1 铷蒸气中激光成丝形成的实验装置示意图(PBS 为偏振分束器, GL 为格兰棱镜)

3. 实验结果

3.1 铷原子蒸气中四波混频

由于铷原子的超精细能级结构, 在铷原子蒸气中存在与三阶非线性效应相关的四波混频现象, 通过扫描探测光来观察拉曼吸收或增益现象. 抽运光的频率 ω_p 相对于 ^{85}Rb 原子 $^5S_{1/2}(F=2) \rightarrow ^5P_{3/2}$ 和 $^5S_{1/2}(F=3) \rightarrow ^5P_{3/2}$ 跃迁失谐分别为 Δ_1 和 Δ_2 , 如图 2 所示. 当扫描探测光的频率时, 如果两个光场满足双光子共振条件, 就会产生拉曼吸收或增益现象, 并且产生的两个拉曼吸收或增益峰的频率为 $\omega_p \pm \omega_{32}$, 其中 $\omega_p - \omega_{32}$ 是斯托克斯分量, $\omega_p + \omega_{32}$ 是反斯托克斯分量, ω_{32} 是 $^5S_{1/2}(F=2)$ 到 $^5S_{1/2}(F=3)$ 基态能级跃迁. 是否产生拉曼吸收或增益依赖于抽运光的频率失谐和功率、铷原子蒸气温度以及斯托克斯或反斯托克斯分量是否位于其他共振吸收线上. 在铷原子蒸气温度由低变高时, 从没有任何拉曼吸收和增益到能观察到拉曼吸收, 然后逐渐出现拉曼增益. 当抽运光功率为 220 mW, 铷原子的蒸气温度为 130 $^{\circ}\text{C}$ 的条件下, 抽运光的频率在 Rb 原子 D_2 线上不同失谐位置, 观察到的拉曼增益峰或吸收峰, 如图 3 所示. 图 3(b) 是抽运光的频率相对于 $F=3 \rightarrow F'$ 跃迁线正失谐 1.6 GHz 时, 在高于抽运光频率 3 GHz 处看到反斯托克斯分量的增益峰, 而斯托克斯分量正好被湮没在 ^{87}Rb 原子的吸收光谱中. 同时观察到相对于抽运光频率正失谐 6.8 GHz 的 ^{87}Rb 反斯托克斯分量的吸收峰. 曲线 (c) 是抽运光的频率相对于 $F=2 \rightarrow F'$ 跃迁线正失谐 1.5 GHz 时, 在距抽运光 ± 3 GHz 处同时观测到斯托克斯和反斯托克斯分量的拉曼增益峰. 这里同时观察到相对于抽运光频率负失谐 6.8 GHz 的 ^{87}Rb 斯托克斯分量的吸收峰.

3.2 克尔效应导致的激光成丝现象

图 4(a) 是在铷泡温度与激光频率失谐一定的条件下, 改变抽运光功率, 在远场观察到的光束成丝的斑图模式. 理论研究表明, 光束成丝后, 囚禁在每一根丝内的能量是一定的, 它不会随着输入功率的增加而增加^[30,31]. 输入功率越大, 成丝的数量就越多, 远场得到的斑图模式也就越复杂. 当抽运光频率相对于 ^{85}Rb 原子 D_2 线上 $F=3 \rightarrow F'$ 的跃迁线正失谐 0.4 GHz, 铷泡的温度为 130 $^{\circ}\text{C}$ 时, 在不同抽运光

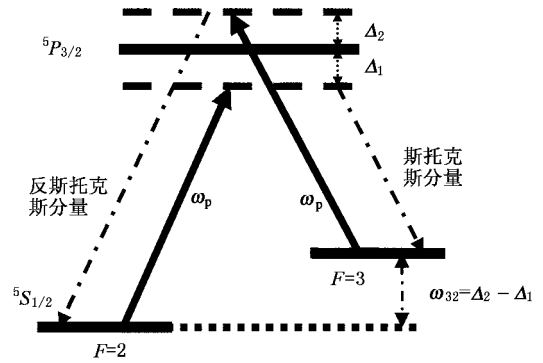


图 2 ^{85}Rb 原子的跃迁能级图

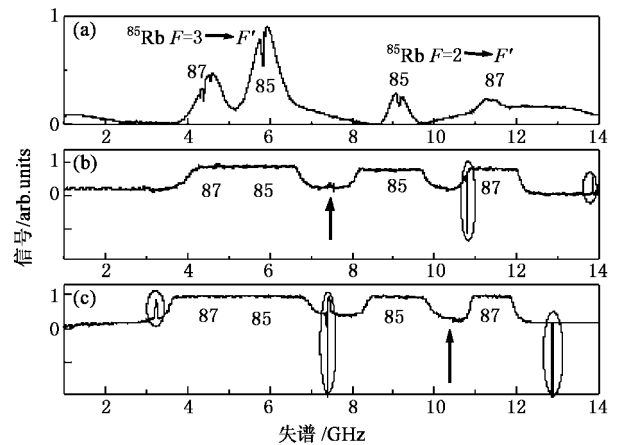


图 3 (a) Rb 原子 D_2 线的饱和吸收光谱, (b) 和 (c) 分别是耦合光在不同失谐位置时得到的拉曼增益峰和吸收峰

功率下, 记录远场斑图模式, 如图 3(a) 所示, 在低功率时, 远场的光斑形状基本上仍然是高斯分布, 随着输入功率的增加, 逐渐发生自聚焦效应, 远场光斑变大, 且在光斑周围出现了许多小斑点, 结构越来越清晰; 功率进一步增大, 光斑会逐渐呈现出比较明显的斑图模式, 这是光束在远场相干叠加的结果; 当输入功率达到 220 mW 时, 斑图模式的光斑最发散, 说明随着抽运光功率的增加, 非线性效应越强, 光束的成丝化现象越来越严重.

图 4(b) 是在铷泡温度为 130 $^{\circ}\text{C}$, 注入功率 220 mW 时, 改变激光频率失谐, 在远场得到的斑图模式. 当激光频率相对于 ^{85}Rb 原子 D_2 线上 $F=3 \rightarrow F'$ 正失谐 1.5 GHz 时, 斑图模式几乎没有分开, 光斑基本上呈现高斯分布, 频率正失谐为 1 GHz 时, 光斑变大了, 但光斑仍然呈现高斯分布, 说明这时自聚焦作用开始显现, 但光束成丝还不明显, 随着失谐越来越小, 斑图模式也渐渐散开, 当激光频率达到相对于 $F=3 \rightarrow F'$ 正失谐 0.4 GHz 时, 斑图模式已经具有非常

明显的形状, 继续减小失谐值, 斑图模式很快消失恢复到初始状态, 当失谐值达到相对于 $F=3 \rightarrow F'$ 负失谐 0.4 GHz 时, 远场光斑变成了一个亮斑. 由此可见, 当光通过原子介质时, 光与原子共振时克尔效应 (三阶非线性效应) 最小, 而正、负失谐, 对应的三阶非线性系数符号正好相反^[32, 33], 正失谐对应着自聚焦效应, 最大克尔效应存在在一个最佳的失谐位置.

图 4(c) 是在改变铷泡温度的条件下, 注入功率为 220 mW, 激光频率相对于⁸⁵Rb 原子 D_2 线上 $F=3 \rightarrow F'$ 的跃迁正失谐 0.4 GHz 时, 远场得到的光束成丝的斑图模式. 改变温度实质上是改变原子的蒸气密度, 也就是改变非线性强度. 从室温 25 °C 开始逐渐增加温度, 当温度达到 100 °C 时, 斑图模式开始出现, 当温度为 130 °C 时, 斑图模式已经非常发散.

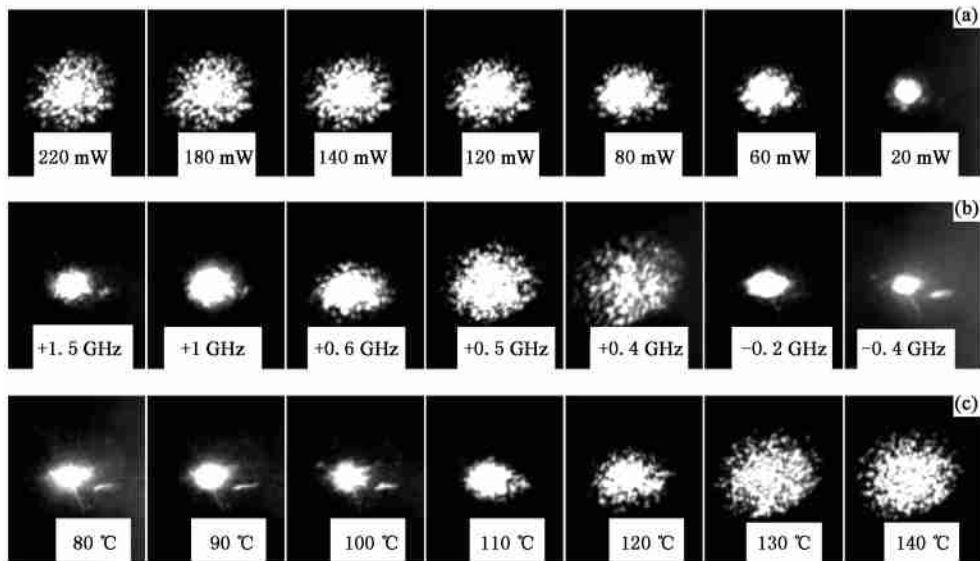


图 4 改变光强(a), 频率(b), 温度(c)在远场得到的斑图模式

以上研究了注入激光功率, 激光频率失谐量, 铷泡的温度对远场的斑图模式的影响, 我们还测量了对应的激光的强度噪声. 在测量强度噪声过程中, 入射到探测器的光功率始终为 270 μW. 图 5 是测得的强度噪声谱. 图 5 是改变激光输入功率测得的强度噪声谱, 从图中可以看出: 在 20 mW 时, 强度噪声最小, 随着输入功率的慢慢增加, 强度噪声也逐渐变大, 当输入功率达到 220 mW 时, 强度噪声达到

最大, 此时的斑图模式也达到了最分散的状态. 说明随着输入功率的增加, 光与介质的非线性作用越来越强, 光束分裂成丝的数量越来越多, 同时也导致光的强度噪声增大. 图 6 是抽运光频率相对于铷原子 D_2 线上 $F=3 \rightarrow F'$ 的不同失谐位置对应的强度噪声谱. 曲线 1, 2, 3, 4, 5 分别对应的失谐量是相对于 $F=3 \rightarrow F'$ 为 1.5 GHz, 1 GHz, 0.6 GHz, 0.4 GHz, -0.4 GHz, 其中正失谐 0.4 GHz 时强度噪声最大, 说明在

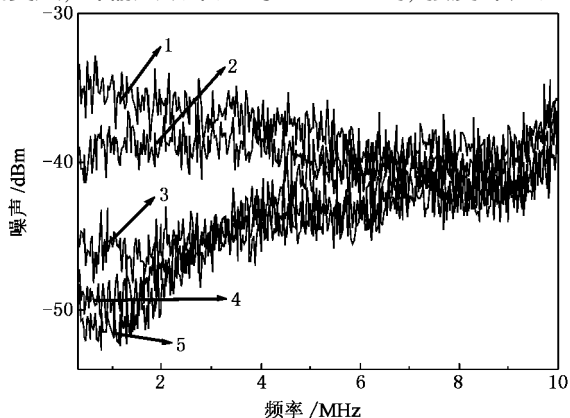


图 5 改变抽运激光器的功率在铷泡后测得的强度噪声谱(曲线 1—5 分别为 220, 160, 120, 80, 20 mW)

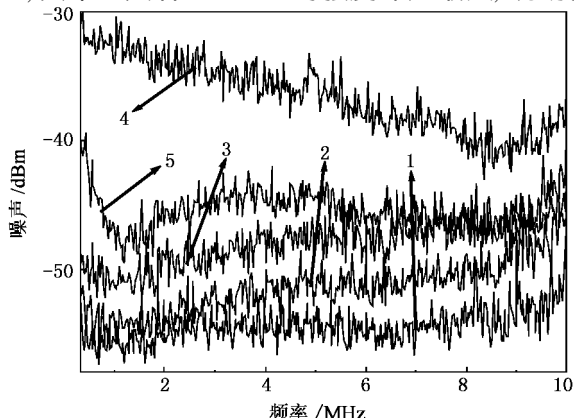


图 6 改变抽运激光器的频率在铷泡后测得的噪声谱(曲线 1—5 分别为 +1.5, +1, +0.6, +0.4 和 -0.4 GHz)

正失谐 0.4 GHz 时光束成丝的数量最多, 在远场观测到的斑图模式最分散, 对应的非线性效应最强, 这正好与观察到的斑图模式的结果相一致.

4. 结 论

实验上研究了输入光功率, 铷蒸气温度和抽运

激光频率相对于⁸⁵Rb 原子 D_2 线的不同失谐位置对衍射图样的影响, 并同时观察到具有斯托克斯和反斯托克斯光子的拉曼增益现象. 由于铷原子蒸气中存在强的非线性效应, 产生的斯托克斯和反斯托克斯光子具有量子纠缠特性^[34, 35], 因此该系统可用于量子纠缠源的产生及应用.

- [1] Berge L 1998 *Phys. Rep.* **303** 259
- [2] Zeff B W, Kleber B, Fineberg J, Lathrop D P 2000 *Nature* **403** 401
- [3] Donley E A, Claussen N R, Comish S L, Roberts J L, Cornell E A, Wieman C E 2001 *Nature* **412** 295
- [4] Robinson P A 1997 *Rev. Mod. Phys.* **69** 507
- [5] Kelley P L 1965 *Phys. Rev. Lett.* **15** 1005
- [6] Fibich G, Gaeta A L 2000 *Opt. Lett.* **25** 335
- [7] Abraham N B, Firth W J 1990 *J. Opt. Soc. Am. B* **7** 951
- [8] Vorontsov M A, Miller W B 1995 *Self-organization in Optical Systems and Applications Information Technology* (Berlin: Springer)
- [9] Xi T T, Lu X, Zhang J 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 025003
- [10] Alessandro G D, Firth W J 1991 *Phys. Rev. Lett.* **66** 2597
- [11] Grynberg G, Maître A, Petrossian A 1994 *Phys. Rev. Lett.* **72** 2379
- [12] Schüpers B, Feldmann M, Ackemann T *et al* 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 748
- [13] Staliunas K, Sanchez-Morcillo V J 2000 *Opt. Commun.* **177** 389
- [14] Gauthier D J, Malcuit M S, Boyd R W 1988 *Phys. Rev. Lett.* **61** 1827
- [15] Grynberg G, Bihan E L, Verkerk P *et al* 1988 *Opt. Commun.* **67** 363
- [16] Benne M L, Ressayre E, Tallet A 1991 *Phys. Rev. A* **43** 6345
- [17] Gaeta A L, Skelton M D, Boyd R W *et al* 1989 *J. Opt. Soc. Am. B* **6** 1709
- [18] Grischkowsky D 1970 *Phys. Rev. Lett.* **24** 866
- [19] Golub I, Erez G, Shuker R 1986 *J. Phys. B* **19** L115
- [20] Shevy T, Rosenbluh M 1988 *J. Opt. Soc. Am. B* **5** 116
- [21] Chaupezcak W, Gawlik W, Zachorowski J 1993 *Opt. Commun.* **99** 49
- [22] Dreischuh A, Kamenov V, Dinev S *et al* 1998 *J. Opt. Soc. Am. B* **15** 34
- [23] Andersen J A, Friese M E J, Truscott A G *et al* 2001 *Phys. Rev. A* **63** 023820
- [24] Bennink R S, Wong V, Marino A M *et al* 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 113901
- [25] Aumiler D, Ban T, Pichler G 2005 *Phys. Rev. A* **71** 063803
- [26] Wei D, Chen H X, Xiong D Z *et al* 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6342 (in Chinese) [卫 栋、陈海霞、熊德智等 2006 物理学报 **55** 6342]
- [27] Zhang J, Tao H, Wei D *et al* 2003 *Acta Opt. Sin.* **23** 197 (in Chinese) [张 靖、陶 桦、卫 栋等 2003 光学学报 **23** 197]
- [28] Zhang J, Wei D, Xie C D, Peng K C 2003 *Opt. Express* **11** 1338
- [29] Zhang J, Zhang T C, Dong R F *et al* 2001 *J. Opt. Soc. Am. B* **18** 1014
- [30] Bespalov V I, Talarov V I 1966 *JETP Lett.* **3** 307
- [31] Boyd R 2003 *Nonlinear Optics* (San Diego: Academic)
- [32] Wang H, Goorskey D, Xiao M 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 073601
- [33] Moseley R R, Shepherd S, Fulton D J *et al* 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 670
- [34] McCormick C F, Boyer V, Arimondo E *et al* 2007 *Opt. Lett.* **32** 3479
- [35] Li X Y, Voss P, Shaping J E, Kumar P 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 053601

Experimental study on laser pattern formation by strong nonlinear effects in rubidium atomic hot vapor^{*}

Guo Lu Wei Dong Chen Hai-Xia Xiong De-Zhi Wang Peng-Jun Zhang Jing[†]

(*State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

(Received 19 November 2007; revised manuscript received 10 March 2008)

Abstract

There are abundant nonlinear effects in atomic vapor. In this paper, the phenomenon of laser breaking up into filaments is studied in the near-resonant rubidium atomic vapor, which is induced by the strong nonlinear Kerr effect. When the continuous-wave laser beam with transverse Gaussian distribution passes through the atomic vapor, the pattern arising from the coherent superposition of the diffraction patterns of filaments is observed. We also investigated the influence on the mode pattern by input power of laser, the temperature of the vapor cell and the frequency detuning of pump light. Due to the hyperfine structure of rubidium atoms, the four-wave mixing effect exists in hot rubidium atomic vapor, which is related to the third-order nonlinear effect closely. The Raman gain of the Stokes and anti-Stokes photons is observed by scanning the frequency of the probe beam.

Keywords: rubidium atomic vapor, Kerr effect, self-Focusing, pattern formation

PACC: 4265J, 4265C

^{*} Project supported by the NSFC for Distinguished Young Scholars (Grant No. 10725416), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2006CB921101), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60678029) and Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University.

[†] Corresponding author. E-mail: jzhang74@sxu.edu.cn, jzhang74@yahoo.com