

^{40}K - ^{87}Rb 原子冷却的半导体激光系统^{*}

卫 栋 陈海霞 熊德智 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)

(2006 年 2 月 20 日收到; 2006 年 6 月 27 日收到修改稿)

对 ^{40}K - ^{87}Rb 原子冷却的半导体激光系统提出了一种实验方案, 并进行了初步实验. 采用三台外腔光栅反馈半导体激光器(ECDL)、四台注入锁定从激光器和一台半导体激光放大器组成激光系统. 三台 ECDL 通过声光调制器产生四束光, 分别作为 ^{40}K 和 ^{87}Rb 原子的冷却光和再抽运光, 四束不同频率成分的激光分别注入锁定四台从激光器, 然后 Rb 冷却光、K 冷却光和 K 再抽运光再同时注入半导体激光放大器进行放大. 该装置可同时产生冷却 ^{40}K 和 ^{87}Rb 原子的冷却光和再抽运光, 结构紧凑、工作稳定.

关键词: 简并费米气体, 激光器系统, 外腔光栅反馈半导体激光器, 半导体激光放大器

PACC: 3280P, 4260

1. 引 言

近年来对费米气体和玻色-费米混合气体的实验与理论^[1-3] 研究引起了人们极大的兴趣, 为研究高温超导的产生、强相互作用等物理机理提供了一个理想的实验研究平台. 费米子与玻色子具有不同的量子统计特性, 由于受泡利不相容原理的限制, 处于同一个量子态的费米子在温度很低时 s 波碰撞被禁止, 蒸发冷却不能有效进行, 费米气体因此无法达到量子简并. 为了克服这一困难, 得到简并费米气体, 目前主要有两种方案. 一种方案是囚禁费米子的不同自旋态, 尽管处于同一自旋态的费米子之间的 s 波碰撞是禁止的, 但是处于不同自旋态的费米子却可以相互发生碰撞, 如选用 ^{40}K 原子的 $(9b, 7b)$ 和 $(9b, 9b)$ ^[4]. 另一种方案是同时囚禁玻色与费米气体, 采用玻色子作为中介, 在蒸发冷却阶段, 通过玻色子与费米子之间的相互碰撞可以将费米子冷却到量子简并, 这种方法称为和应冷却 (sympathetic cooling), 成为冷却费米气体中使用较多的方法. 人们已先后在 ^{40}K 和 ^{87}Rb ^[5], ^6Li 和 ^7Li ^[6-8], ^6Li 和 ^{23}Na ^[9], ^6Li 和 ^{87}Rb ^[10] 等系统中实现了费米气体简并, 其中 ^{40}K 和 ^{87}Rb 成为选用较多的一个系统.

在超冷原子物理研究领域, 使用激光对原子进

行冷却、俘获与操控已成为非常成熟的技术. 半导体激光器以其价格低、可靠性高、操作简单等优点而被广泛采用. 半导体激光器的缺点是输出功率比较小, 但目前已经有比较成熟的半导体激光放大器, 能够在输入功率很小的情况下, 得到比较大的功率输出, 如德国 Toptica 公司生产的半导体激光锥形放大器 (tapered amplifier, 简记为 TA) 在输入功率几十毫瓦时, 输出功率可以达到瓦级以上. 在 ^6Li 和 ^7Li 实验中, Ferrari 等^[11] 首先提出了一种简单稳定的半导体激光系统方案, 他们采用两台半导体激光器作为光源, 两束光的频率相差可以达到 12 GHz, 稳频后注入同一个 TA 进行放大, 同时产生用于 ^6Li 和 ^7Li 磁光阱的冷却光和再抽运光. 这种方法也可以推广到多束光且波长相差比较大的情况. ^{40}K 和 ^{87}Rb 的 D_2 跃迁线分别为 767 和 780 nm, 波长相差是 13 nm, 因此可以使用相同的反射镜、棱镜、光纤和放大器. 目前, 采用将 ^{40}K 和 ^{87}Rb 的冷却光和再抽运光注入到同一个 TA 中放大后得到比较大的功率来进行 K, Rb 原子的冷却与俘获已被许多研究小组采用^[12-14].

2. 实验方案

在冷原子实验中, 冷却和俘获一种原子通常需要两束不同频率的激光, 分别叫做冷却光和再抽运

*教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号:NCET-04-0256)和高等学校博士学科点专项科研基金(批准号:20050108007).

† 通讯联系人. E-mail: jzhang74@yaho.com

光. 冷却光是指调谐到原子循环跃迁线上, 对原子产生减速作用力的激光, 而再抽运光是指把自发辐射落到基态与冷却光失谐的其他精细能级上的原子重新抽运到冷却过程中的激光. 在量子简并费米气体 ^{40}K 实验中, 要同时冷却 ^{40}K 和 ^{87}Rb 原子, 就需要四束不同波长的激光来实现对两种原子的冷却与俘获. 因此要求激光器系统能够同时产生用于 ^{40}K 和 ^{87}Rb 两种原子磁光阱的冷却光和再抽运光, 且对激光系统的长期稳定性要求较高.

在我们的实验中, 使用三台外腔光栅反馈半导体激光器 (ECDL)、四台注入锁定从激光器 (slave laser, 简记为 SL) 和一台 TA 组成激光系统, 采用了注入锁定技术和主振荡功率放大实验方案, 极大地简化了激光系统装置. 实验系统装置的难点主要有两处: 一是对主激光器稳频的长期稳定性要求高; 二是要求能够有效实现从激光器的注入锁定. 为了克服这些困难, 使整个系统能够长时间保持稳定, 我们在主激光器稳频时没有直接调制激光器的电流, 而是通过在外部加调制信号的方法获得鉴频曲线来锁定激光器的频率, 同时主激光器单独使用一个光学平台, 减小了机械振动对系统的干扰. 为了有效实现 SL 的注入锁定, SL 使用精密低噪声电流源并对其进行了精确控温.

3. 实验装置和实验结果

实验中, 三台都是 Littrow 结构的 ECDL 作为主激光器使用, 都采用饱和吸收光谱技术进行稳频^[15-17]. 稳频后, 通过声光调制器 (AOM) 移频产生四束不同频率成分的激光分别注入锁定四台 SL, 然后 Rb 冷却光、K 冷却光和 K 再抽运光再注入 TA 进行放大, 从 TA 输出的激光单次穿过 110 MHz 的 AOM 频率整体偏移 -110 MHz, 用于 ^{40}K 和 ^{87}Rb 原子的磁光阱冷却和俘获.

实验系统中有两台主激光器的波长是 780 nm, 其中一台是 Toptica 公司生产的 DL100 型激光器, 输出功率为 70 mW, 用作 Rb 原子的冷却光. 从激光器输出光束中分出一小部分光 B_2 (约 1 mW) 用来做饱和和吸收稳频, 如图 1(a) 所示. B_2 又分成三束, 其中光束 1 是检测光, 光束 2 是参考光, 光束 3 是饱和光, 光束 3 通过 110 MHz 的 AOM 移频后 +1 级衍射光注入 Rb 吸收泡, 在空间上与检测光重合, 但传播方向相反, 稳频时对激光器的调制信号加载在 AOM

上. 这样, 既可以通过 AOM 设置激光的频率, 又避免了直接对激光器电流进行调制所引起的抖动. 把激光器锁在 Rb 原子 $F=2 \rightarrow F'=3$ 跃迁线上, 则激光器的输出频率 $\nu_{\text{laser}} = \nu_{2 \rightarrow 3} - 55 \text{ MHz}$, $\nu_{2 \rightarrow 3}$ 表示 ^{87}Rb 原子 $5^2S_{1/2}, F=2 \rightarrow 5^2P_{3/2}, F'=3$ 共振跃迁频率. 大部分激光 B_1 两次穿过 75 MHz 的 AOM, 频率偏移 +150 MHz, 再加上从 TA 输出后 -110 MHz 的移频, Rb 冷却光频率设定在 $\nu_{\text{Rb,c}} = \nu_{2 \rightarrow 3} - 55 + 150 - 110 \text{ MHz} = \nu_{2 \rightarrow 3} - 15 \text{ MHz}$, 即相对于 $F=2 \rightarrow F'=3$ 跃迁线负失谐 15 MHz, 其中 $\nu_{\text{Rb,c}}$ 表示 Rb 冷却光的频率. 另外一台 780 nm 的主激光器 (Sacher DL100 型) 用作 Rb 原子的再抽运光, 采用和 Rb 冷却光相同的频率设置方案, 稳频时通过 80 MHz 的 AOM 对激光器进行外部调制, 锁在 Rb 原子 $F=1 \rightarrow F'=1 - F'=2$ 交叉线上, 出射光束两次穿过 110 MHz 的 AOM, 频率偏移 +220 MHz. 最后再通过 AOM 频率偏移 -110 MHz, $\nu_{\text{Rb,r}} = \nu_{1 \rightarrow 2} - 157.1/2 - 40 + 220 - 110 \text{ MHz} = \nu_{1 \rightarrow 2} - 8.5 \text{ MHz}$, 即相对于 $F=1 \rightarrow F'=2$ 跃迁线负失谐 8.5 MHz, 其中 $\nu_{\text{Rb,r}}$ 表示 Rb 再抽运光的频率. 第三台主激光器 (Toptic DL100 型) 的波长为 767 nm, 对应于 K 原子的 D_2 线, 由于 ^{40}K 的基态能级分裂为 1286 MHz, 因此通过 AOM 移频, 可以同时产生 K 原子的冷却光和再抽运光, 如图 1(b) 所示. 通过 110 MHz 的 AOM 对激光器进行调制, 把激光器锁在 ^{39}K 的 $F=1 \rightarrow F'=0, 1, 2$ 跃迁线上. 出射激光分作两部分, 一部分用作 ^{40}K 原子的冷却光, 两次穿过 210 MHz 的 AOM, 频率偏移 +420 MHz; 另一部分用作 ^{40}K 的再抽运光, 四次穿过频率为 205 MHz 的 AOM, 频率偏移 -820 MHz, 注入 TA 放大输出后, 再偏移 -110 MHz. K 冷却光频率 $\nu_{\text{K,c}} = \nu_{1 \rightarrow 0-2} + 55 + 420 - 110 \text{ MHz} = \nu_{1 \rightarrow 0-2} + 365 \text{ MHz} = \nu_{9/2 \rightarrow 11/2} - 14.2 \text{ MHz}$, 即相对于 ^{40}K 的 $F=9/2 \rightarrow F'=11/2$ 跃迁线负失谐 14.2 MHz, 其中 $\nu_{1 \rightarrow 0-2}$ 表示 ^{39}K 的 $F=1 \rightarrow F'=0, 1, 2$ 跃迁线, $\nu_{9/2 \rightarrow 11/2}$ 表示 ^{40}K 的 $F=9/2 \rightarrow F'=11/2$ 跃迁线, $\nu_{\text{K,c}}$ 表示 K 冷却光的频率. K 再抽运光频率 $\nu_{\text{K,r}} = \nu_{1 \rightarrow 0-2} + 55 - 820 - 110 \text{ MHz} = \nu_{1 \rightarrow 0-2} - 875 \text{ MHz} = \nu_{7/2 \rightarrow 9/2} - 11.4 \text{ MHz}$, 即相对于 ^{40}K 的 $F=7/2 \rightarrow F'=9/2$ 跃迁线负失谐 11.4 MHz, 其中 $\nu_{\text{K,r}}$ 表示 K 再抽运光的频率. 这四束不同波长的光分别通过单模保偏光纤 (OZ optics) 转移到另外一个光学平台上, 光纤的型号是 LPC-02-780-5/25-P-2.4-11AS-40-A3A-3-4. 这样, 所有的激光源都可以单独放在一个光学平台上,

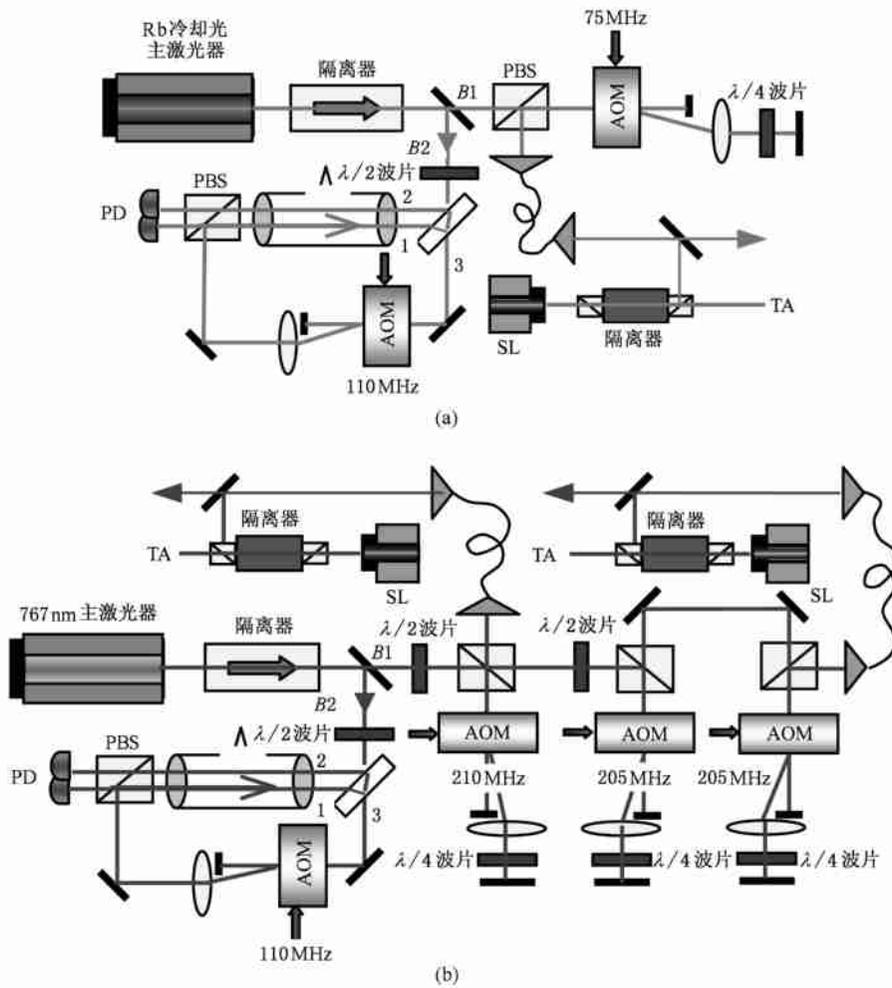


图 1 激光器稳频及注入锁定原理图 (a) Rb 冷却光光路, (b) K 冷却光和再抽运光光路. PBS 为偏振分束器, PD 为光电二极管

尽量减小外界的干扰而保持稳定。

由于 AOM 衍射效率和光纤耦合效率以及光路中损耗的限制, 从光纤输出的光功率比较小, 四束光的功率分别是 Rb 冷却光为 12 mW, Rb 再抽运光为 8.2 mW, K 冷却光为 2.4 mW, K 再抽运光为 2.1 mW, 为了得到适当的激光功率注入 TA 进行放大, 我们首先将光纤输出的光分出一小部分注入锁定自制的 SL, 制作 SL 的是由 Sacher 公司生产的 FP-0780-070, FP-0765-030 型半导体激光二极管 (LD). LD 固定在一个精确控温的紫铜热沉上, 控温仪是本所自行研制生产的高精度控温仪, 控温精度为 0.01 °C. 激光电流源是 Thorlabs LDC202 型高精度电流源, 从 LD 发出的光首先用准直透镜 (Thorlabs C230TM-B 型) 准直, 然后经过一个隔离比为 40 dB 的带有偏振输出口的 ISOWAVE I-780T-5H 型隔离器以防止光反馈. 种子光从偏振输出口注入激光器, 注入功率小于

1 mW. 剩余的种子光可以用作推送光、探测光等. 注入锁定原理如图 1 所示, 图中只画出了 Rb 冷却光和 767 nm 激光器的光路, Rb 再抽运光的光路与 Rb 冷却光的光路是相同的. 调节 SL 的温度和电流, 当 SL 的频率与注入种子光的频率接近时, 可以实现有效的注入锁定. 锁定后, 如果改变 SL 的电流, 可以看到在大约 2 mA 的范围内, SL 的输出频率保持不变. 实验中, 用于 K 冷却光和 K 再抽运光注入锁定的 LD 在 25 °C 自由运转时的波长为 771 nm, 距离 K 原子的 D_2 线 767 nm 较远, 我们对 LD 进行密封冷却, 在 0 °C 附近得到 767 nm 的激光输出. 用作 Rb 原子冷却光和再抽运光的从激光器则工作在室温附近.

为了得到用于磁光阱更大功率的激光, 我们使用了一台 TA 来进行二级放大. 因为 Rb 再抽运光在注入锁定后的输出功率有 65 mW, 可以满足 Rb 原子的精细结构再抽运. 而 ^{40}K 原子的激发态能级分裂很

小,只有 10^7 Hz 量级,所以需要更多的再抽运光,因此在实验中,只把 Rb 冷却光、K 冷却光和 K 再抽运光三束光注入到 TA 中进行放大.图 2 是 TA 光路示意图.从图 2 可以看到,三台 SL 输出的激光,经过一系列的 $\lambda/2$ 波片和偏振分光棱镜后,以相同的垂直偏振方向注入到 TA 中,波片是 767 和 780 nm 的双波长波片.旋转波片的角度,可以很方便地调节三束激光相对功率的大小,这是我们实验系统的一个优点.TA 从输入口和输出口两个方向会发出自发辐射

荧光,要得到最佳的放大效果,需要对注入激光与 TA 的自发荧光进行匹配,我们采用了望远镜系统和一对整形棱镜 AP 对来进行匹配.在 TA 的温度为 22 °C、电流为 2.3 A 时,测得的注入光与输出光的关系曲线如图 3 所示.从图 3 可以看出,该放大器对 780 nm 激光放大作用大约是对 767 nm 激光放大作用的两倍,这与 TA 的出厂技术指标是一致的.K 冷却光和 K 再抽运光的放大曲线略有差别,可能是 K 冷却光匹配不是最佳造成的.

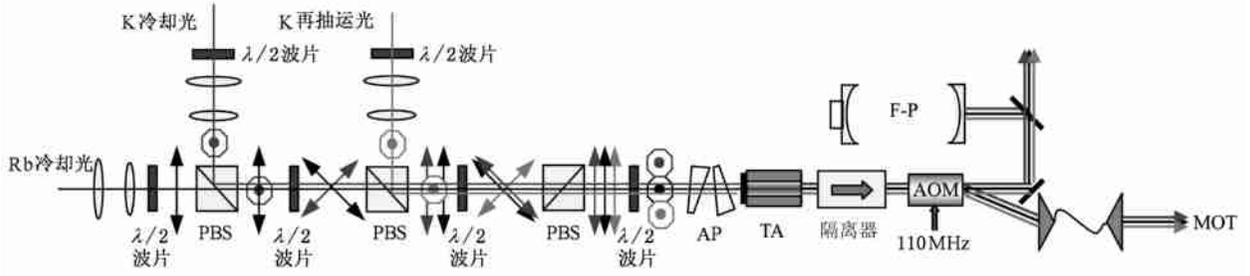


图 2 TA 光路示意图

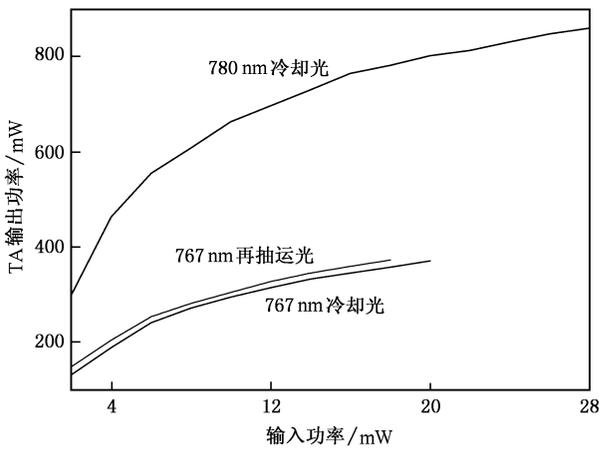


图 3 TA 输出功率与注入功率的关系

是 Rb 冷却光与 K 冷却光和 K 再抽运光波长相差 13 nm,没有观察到边带出现.

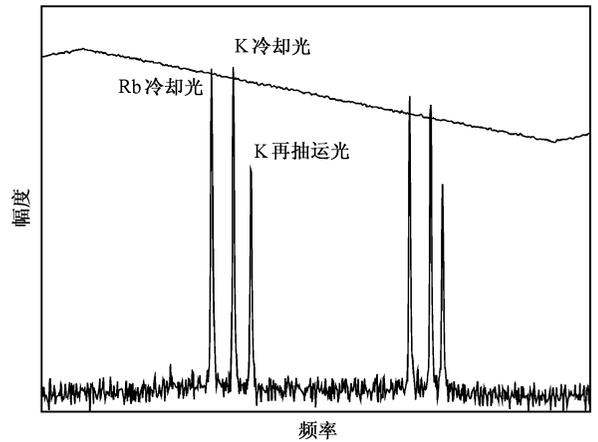


图 4 F-P 腔透射峰曲线

从 TA 输出的光首先经过一个隔离比为 60 dB 的 Linos FI-790-TV 型光隔离器来防止剩余光反馈对放大器的影响,然后单次穿过 110 MHz 的 AOM 来设置光的频率,偏移 -110 MHz, -1 级光经过光纤滤波后用于原子磁光阱(MOT), 0 级光分出一小部分送入 F-P 腔监视激光器的模式.图 4 是扫描 F-P 腔得到的透射峰曲线,旋转 $\lambda/2$ 波片,当三束光的功率相等时,TA 输出约为 360 mW.实验中, K 冷却光和 K 再抽运光的频率相差只有 1286 MHz,同时注入 TA 后,由于非线性作用,我们观察到有边带模产生,但

4. 结 论

我们采用三台 ECDL,四台注入锁定 SL 和一台 TA 组成 ⁴⁰K-⁸⁷Rb 原子冷却的激光系统.该系统可以很方便地调节 ⁴⁰K 和 ⁸⁷Rb 冷却光和再抽运光的相对强度,并具有结构紧凑、工作稳定的特点,可以进行超冷玻色费米混合物和费米气体相关实验研究.

- [1] Wu H Y, Yin L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 490 (in Chinese) [武宏宇、尹 澜 2006 物理学报 **55** 490]
- [2] Men F D 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1622 (in Chinese) [门福殿 2006 物理学报 **55** 1622]
- [3] Su G Z, Chen L X 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 984 (in Chinese) [苏国珍、陈丽璇 2004 物理学报 **53** 984]
- [4] DeMarco B, Jin D S 1999 *Science* **285** 1703
- [5] Roati G, Riboli F, Modugno G *et al* 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 150403
- [6] Schreck F, Khaykovich L, Corwin K L *et al* 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 080403
- [7] Bourdel T, Khaykovich L, Cubizolles J *et al* 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 050401
- [8] Zhang J, Van Kempen E G M, Bourdel T *et al* 2004 *Phys. Rev. A* **70** 030702
- [9] Hadzibabic Z, Stan C A, Dieckmann K *et al* 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 160401
- [10] Silber C, Gunther S, Marzok C *et al* 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 170408
- [11] Ferrari G, Mewes M O, Schreck F *et al* 1999 *Opt. Lett.* **24** 151
- [12] Aubin S, Extavour M H T, Myrskog S *et al* 2005 *J. Low Temp. Phys.* **140** 377
- [13] Goldwin J, Papp S B, DeMarco B *et al* 2002 *Phys. Rev. A* **65** R021402
- [14] Nyman R A, Varoquaux G, Villier B *et al* 2006 *Rev. Sci. Instrum.* **77** 033105
- [15] 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]
- [16] Zhang J, Wei D, Xie C D *et al* 2003 *Opt. Express* **11** 1338
- [17] Wang Y H, Yang H J, Zhang T C *et al* 2005 *Chin. Phys.* **14** 1120

A laser diode system for ^{40}K - ^{87}Rb atomic cooling^{*}

Wei Dong Chen Hai-Xia Xiong De-Zhi Zhang Jing[†]

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

(Received 20 February 2006; revised manuscript received 27 June 2006)

Abstract

We have developed a semiconductor laser system used in ^{40}K - ^{87}Rb trapping and cooling experiment. The laser diode system is composed of three external cavity diode lasers and four injection diode lasers and a tapered amplifier. Four laser beams used for ^{40}K and ^{87}Rb cooling and repump lights are obtained by using acoustic optic modulators to offset the frequencies from the three external cavity diode lasers. Four light beams with different frequencies are injected into four slave lasers for injection locking. Then Rb cooling light, K cooling light and K repump light are injected into a semiconductor tapered amplifier in a master oscillator-power configuration. This configuration is flexible and stable and can simultaneously produce the cooling and repump light for ^{40}K and ^{87}Rb trapping and cooling experiment.

Keywords: degenerate Fermi gas, laser system, external cavity grating feedback diode laser, semiconductor tapered amplifier

PACC: 3280P, 4260

^{*} Project supported by the Program for the New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China (Grant No. NCET-04-0256) and the Doctoral Program Foundation of Institution of Higher Education of China (Grant No. 20050108007).

[†] Corresponding author. E-mail: jzhang74@yahoo.com