

Er³⁺ 掺杂玻璃腔内增强激光冷却理论分析*贾佑华^{1)†} 高勇¹⁾ 钟标²⁾ 印建平²⁾

1) (上海第二工业大学理学院, 上海 201209)

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

(2013年10月27日收到; 2014年1月1日收到修改稿)

近年来, 掺 Er³⁺ 的 CdF₂-CdCl₂-NaF-BaF₂-BaCl₂-ZnF₂ 玻璃已成为固体材料激光冷却领域中新的研究材料之一. 本文利用激光器输出理论和驻波腔内共振增强原理分析了该材料的两种腔内增强激光的冷却, 计算结果表明腔增强可获得几十到几百倍的增强因子. 此外, 比较了内腔和外腔这两种增强方案, 研究结果表明, 当材料的吸收比较小时, 特别是材料长度小于 0.3 mm 时, 采用内腔增强方案, 腔内抽运功率高, 冷却材料对激光的吸收大. 然而当材料的吸收比较大时, 特别是材料长度大于 3 mm 时, 外腔增强方案更具优越性. 最后, 根据 Er³⁺ 掺杂材料制冷工作波长和功率的要求, 指出腔增强实验可通过半导体激光器来实现.

关键词: 激光制冷, 稀土离子, 腔内增强

PACS: 42.60.Da, 42.15.Eq

DOI: 10.7498/aps.63.074203

1 引言

早在 1929 年, Pringsheim 提出了利用反斯托克斯荧光对材料进行制冷的思想^[1], 制冷原理是某些特殊的稀土掺杂材料可通过吸收低频激光光子并辐射高频荧光光子, 从而实现材料的冷却. 此后, 人们对气体、液体和固体材料的激光制冷进行了理论分析和实验研究, 但由于合适激光光源、荧光材料、量子效率及实验环境等条件的限制, 其发展非常缓慢. 直到 1995 年 Epstein 等成功实现了掺杂 Yb³⁺ 重金属氟化物玻璃 ZBLANP (ZrF₄-BaF₂-LaF₃-AlF₃-NaF-PbF₂) 的激光冷却^[2], 并获得了 0.3 K 的温度降低, 从而实现了反斯托克斯荧光制冷的历史性突破. 随后, 固体材料激光制冷领域的发展趋势是新材料的探索和获得更低的温度. 1999 年 Mungan 对 Yb³⁺ 掺杂的 ZBLANP 光纤样品实现了从 298 K 到 282 K 的降温^[3]. 2000 年, Hoyt 等首次实现了掺 Tm³⁺: ZBLANP 玻璃的反斯托克斯荧光冷却^[4], 并在 2003 年实现了 19K 的

降温^[5]. 2001 年, Fernandez 等在常温到 77 K 范围内实现了掺 YbF₃ 的 CNBZN 和 BIG 玻璃的激光冷却^[6,7].

起初固体材料激光冷却实验中采用的样品多为 Yb³⁺ 掺杂的重金属氟化物玻璃与光纤或晶体材料^[8-12], 对 Er³⁺ 掺杂材料的研究相对少一些, 有研究表明掺杂 Er³⁺ 材料的上转换发光非常多见^[13,14], 因此在激光制冷领域具有很广泛的应用前景^[15,16]. 比较代表性的工作是 Fernandez 小组采用是钛宝石 899 激光器, 最大输出为 2.5 W, 成功实现了 Er³⁺ 掺杂 CNBZN 玻璃和 KPb₂Cl₅ 晶体的降温^[17]. 目前制约激光制冷商业化的一个最大的因素就是制冷功率不够, 负载能力低. 在激光制冷中可供使用的功率 P_{applied} 可表示为^[18]

$$\begin{aligned} P_{\text{applied}} &= P_{\text{cool}} + P_{\text{loss}} + P_{\text{load}} \\ &= P_{\text{abs}}\eta + P_{\text{loss}} + P_{\text{load}}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中 P_{applied} 指可供应用的制冷功率, P_{cool} 指总的制冷功率, P_{loss} 指由于无辐射跃迁所导致的制冷损失, P_{abs} 指材料吸收的光功率, P_{load} 指冷却

* 国家自然科学基金(批准号: 10974055)、上海市教育委员会科研创新项目(批准号: 12YZ177)和上海高校青年教师培养资助计划(批准号: egd11005)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: yhjia@sspu.edu.cn

材料的接触和辐射热负载, η 指量子效率. 从(1)式我们发现要想获得净的制冷功率, 需满足条件 $P_{\text{cool}} < -(P_{\text{loss}} + P_{\text{load}})$. 由于量子效率是材料的固有属性, 所以要想提高制冷功率就需要设法提高制冷样品的吸收光功率 P_{abs} . 常见的方法有两种, 一是采用大功率激光器, 该方法成本比较高, 且激光冷却的工作波长范围通常比较苛刻, 选择合适的光源会比较困难. 二是采用各种不同的光路设计^[19]来提高吸收, 这是激光冷却研究者们目前主流的研究趋势. 例如美国阿拉莫斯实验室研究者们通过把样品放在两块镀介质膜反射镜之间, 从而实现超过200多次的来回反射, 实现吸收增强^[5]. 在本文中, 我们提出两种腔内增强的方案来增加材料对抽运激光的吸收, 从而提高制冷功率.

2 两种腔增强方案

2.1 外腔增强方案

如图1所示, 反射率分别为 R_1, R_2 的反射镜 M_1, M_2 构成驻波腔, 腔长为 L , 抽运光经 M_1 透射过后, 在两面反射镜之间来回多次反射, 两腔镜的振幅反射率分别为 r_1, r_2 , 把制冷样品放在两块高反射镜之间, 样品材料的长度为 d , 吸收系数为 α , 根据比尔定律, 每次激光通过样品的吸收损失为 $1 - e^{-\alpha d}$, 同时考虑样品材料的端面损失及其他损失为 x, k 为波矢. 可通过腔内光强叠加推导得到腔内驻波场的光强表达式为

$$I = \frac{I_0}{1 + [r_1 r_2 (1 - x) e^{-\alpha d}]^2 - 2 r_1 r_2 (1 - x) e^{-\alpha d} \times (1 - \cos 2kx)}. \quad (2)$$

腔内平均光强为

$$\bar{I} = \frac{I_0}{1 + [r_1 r_2 (1 - x) e^{-\alpha d}]^2 - 2 r_1 r_2 (1 - x) e^{-\alpha d}}. \quad (3)$$

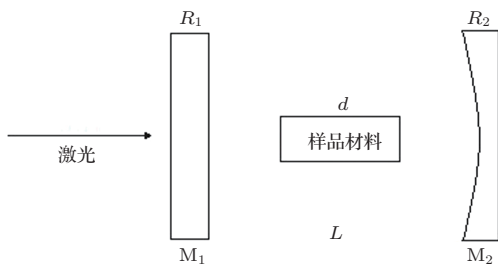


图1 外谐振腔制冷示意图

增强因子为

$$E_{\text{cav}} = \bar{I}/I = \frac{(1 - r_1^2)}{1 + [r_1 r_2 (1 - x) e^{-\alpha d}]^2 - 2 r_1 r_2 (1 - x) e^{-\alpha d}}. \quad (4)$$

计算中我们取 $R_2 = r_2^2 = 99.9\%$, $x = 2\%$, $d = 2$ mm, Er^{3+} 掺杂 CNBZN 材料的吸收系数 α 已测得为 0.317 cm^{-1} ^[20], 则 $\alpha d = 0.317 \text{ cm}^{-1} \times 0.2 \text{ cm} = 0.0634$. 我们得到了不同样品长度下第一片反射镜的反射率与增强因子的变化关系, 如图2所示. 一方面我们发现随着制冷材料长度的增加, 增强因子快速衰减, 这主要是由于样品的吸收损耗. 另一方面可以发现增强因子与第一块镜片的反射率密切相关, 反射率小进入腔内的激光光强大, 但腔内来回共振损失大; 反射率大腔内振荡损失小, 但进入腔内的激光光强小, 因此存在一个最佳的反射率. 图3所示的是最佳腔镜反射率下的腔内增强因子随制冷样品材料长度的变化关系, 我们发现材料长度增加, 最大的增强因子降低. 因此在设计外腔增强制冷时需要综合考虑样品长度和腔镜反射率的因素, 从而获得最优化的增强因子.

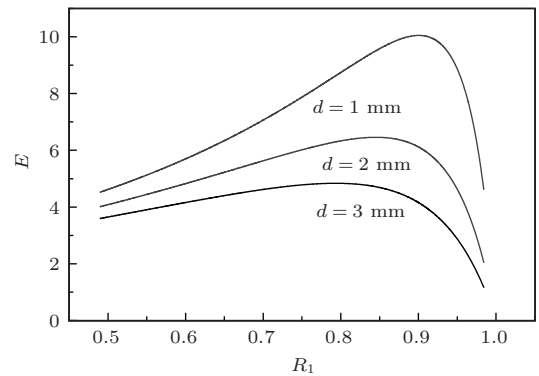


图2 第一块腔镜反射率与外腔增强因子的变化关系

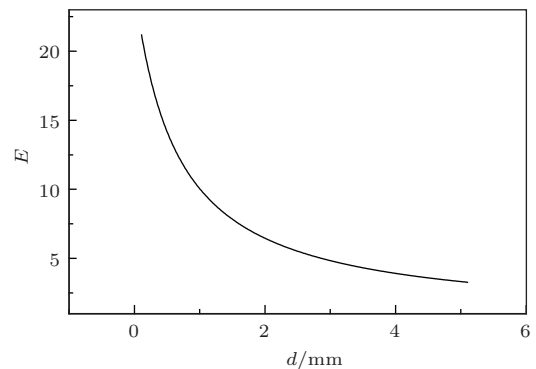


图3 最佳腔镜反射率下的增强因子随样品材料长度的变化关系

2.2 内腔增强方案

采用外谐振腔固体材料激光冷却有一个缺点, 就是必须得考虑入射镜的透射率. 这里我们可以在激光器腔内放置冷却材料, 该方案就避免了入射镜的透射率问题, 从而大大提高了腔内光强和样品对光的吸收.

根据激光原理, 我们先引入典型激光器的输出功率 P_{out} 表达式^[21] 为

$$P_{out} = \frac{1}{2} AI_s T \left(\frac{2g_0}{T + \delta_0} - 1 \right), \quad (5)$$

其中 A 为平均有效横截面积, I_s 为系统饱和参量, T 为输出镜的透射率, g_0 为增益, δ_0 为腔内其他损耗 (包括 M_1 的反射损失、样品的增益损失等).

现在我们计算这种腔结构的增强因子. 如图 4 所示, 设激光谐振腔由腔镜 M_1 和 M_2 构成, 镜 M_1 的反射率足够高, 镜 M_2 的透射率为 T , 反射率为 $1 - T$. 设腔内增益介质的增益为 g_0 , 样品材料的长度为 d , 吸收系数为 α , 样品材料的端面透射损耗为 δ_s , 其他损耗为 δ_0 , 则根据 (3) 式可得腔内振荡光功率 P_{circ} 为

$$P_{circ} = \frac{1}{2} AI_s \left(\frac{2g_0}{T + \delta_0 + \delta_s + 2\alpha d} - 1 \right). \quad (6)$$

则腔内振荡光功率与输出光功率之比, 即光功率放大倍数 E 可表示为:

$$E = \frac{P_{circ}}{P_{out}} = \frac{\frac{2g_0}{T + \delta_0 + \delta_s + 2\alpha d} - 1}{T \left(\frac{2g_0}{T + \delta_0} - 1 \right)}. \quad (7)$$

在小信号增益情况下, $g_0 = 0.089$, $\delta_0 = 0.076$, $\delta_s = 0.004$, 样品的长度设为 2 mm, 则 $\alpha d = 0.0634$.

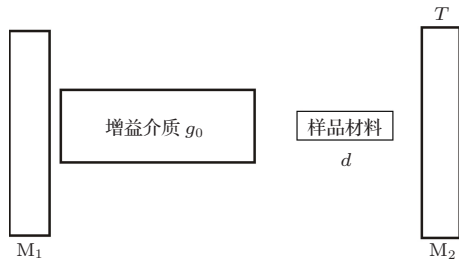


图 4 内腔增强制冷方案图

根据以上参数我们得到了不同样品长度时镜 M_2 的透射率与内腔增强因子 E 的关系如图 5 所示, 我们计算了透射率从 0.1% 到 1% 时的情况. 随着

透射率的增大或者材料的长度增加, 都会造成腔内损耗增大, 增强因子变小.

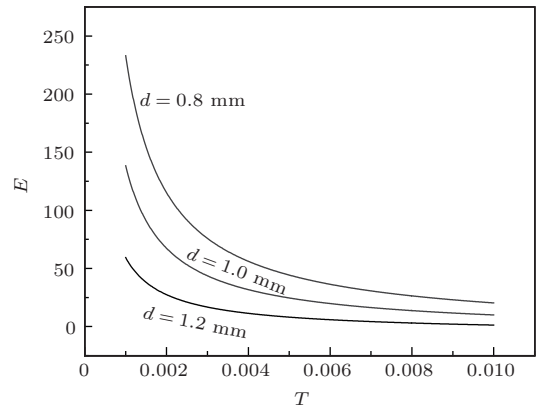


图 5 不同材料长度下第二块镜片透射率与内腔增强因子 E 的关系

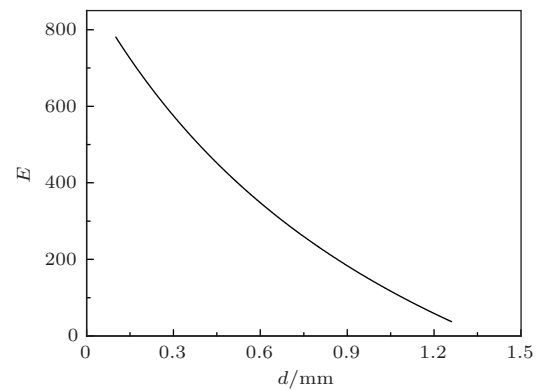


图 6 透射率为 0.1% 时不同材料长度下的功率增强因子

图 6 所示的是当透射率为 0.1% 时, 放大倍数与样品长度之间的关系. 从图 6 可以看出, 当样品长度增加时, 增强因子下降, 这是样品长度增加导致腔内损耗增加所引起. 此外还存在一个长度的极大值, 在我们选的参数下为 1.37 mm, 如果样品长度大于该数值, 则由于样品的损耗导致腔内总损耗大于增益, 就不能实现光放大.

2.3 两种增强方案比较

上面我们分析了两种不同腔结构的光强增强因子, 但在激光冷却实验中, 根据方程 (1) 我们知道决定最终制冷功率的要素是材料对光的吸收. 增强因子和吸收光功率之间是没有必然联系的, 例如我们通过上面的分析可很明显看出内腔增强虽然可以获得很高的增强因子, 但是高增强的条件必须是材料长度短损耗小, 这就限制了吸收光功率. 下

面我们分析这两种增强方案中制冷材料的吸收情况.

对于外腔方案, 材料的吸收光功率可以通过多次吸收理论来计算; 对于内腔方案, 要先计算出腔内振荡功率, 随后导出所吸收的光功率. 我们将对这两种方案吸收的光功率计算并作比较.

目前人们已经可以通过在激光器腔内插入声光调制器来测量激光器的增益和损耗^[18]. 在分析计算中我们取典型值: $g_0 = 0.089$, $\delta_0 = 0.078$.

对于外腔方案, 最终材料的吸收光功率可根据多次吸收计算表示为^[18]

$$P_{\text{abs}} = (\sqrt{g_0} - \sqrt{\delta_0})^2 T_w (1 - T_s) \frac{1 - (\theta T_s)^N}{1 - \theta T_s}, \quad (8)$$

其中 T_w 为材料一个单面的通过率, 对于镀上增透膜后, $T_w = 99.9\%$; T_s 是光单次通过材料的透过率, $T_s = e^{-\alpha d}$; θ 为除去材料吸收后单程剩余光强比例, $\theta = T_w^2 R$, $R = 99.9\%$, N 为多次吸收的次数.

对于内腔方案, 最终的吸收光功率由下式来表征:

$$P_{\text{abs}} = \alpha d \left(\frac{g_0}{\delta_0 + \delta_{\text{cell}} + \alpha d} - 1 \right), \quad (9)$$

其中 δ_{cell} 为腔内材料表面的反射损失和其他损失的总和. 这里我们取 $\delta_{\text{cell}} = 0.001$.

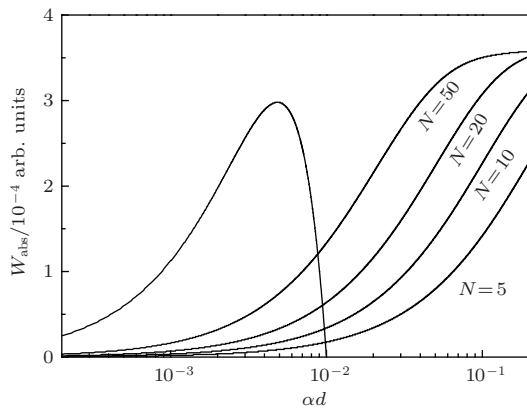


图7 两种增强方案在不同光密度下材料吸收光强的比较

图7所示的是两种方案在不同光密度下材料吸收光强的比较. 其中多次吸收次数我们计算了 $N = 1, 5, 10, 20, 50$ 五种情况. 图中所示在吸收较小的情况下, 内腔方案具有明显的优势, 即使来回通过次数 N 趋于无穷大, 也无法超过内腔的优越性. 从图中还可以看出, 当材料的吸收 $\alpha d < 0.01$ 时, 对于 $\text{Er}^{3+}:\text{CNBZN}$ 材料, 材料厚度 $d < 0.3 \text{ mm}$, 内腔增强方案可获得较高的光吸收, 它比高达 20

次以上多次吸收还要优越; 当材料的吸收 $\alpha d > 0.1$ 时, 即材料厚度 $d > 3 \text{ mm}$, 由于内腔的损耗很大, 外腔多次吸收方案具有比较好的增强效果.

3 结论和展望

本文理论分析了掺杂 $\text{Er}^{3+}:\text{CNBZN}$ 玻璃材料两种腔增强方案的设计, 计算结果表明腔增强可大大提高抽运光的功率, 可达到几十到百倍的增强因子, 有利于小的功率实现了固体材料的荧光冷却, 为荧光制冷的小型化和商业化问题作铺垫. 此外分析还表明腔增强方案可以大大增强材料对抽运光的吸收, 可提高制冷功率, 内腔增强方案适合光密度较小的情况 $\alpha d < 0.01$, 而外腔增强方案适合光密度较大的情况 $\alpha d > 0.1$. 另一方面半导体激光器在实验上提供了高效率的抽运源^[22,23], 也有了更加丰富的抽运波长. 特别是 InGaAsP 基的高功率半导体激光器具有 10 年以上的寿命. 对于 $\text{Er}^{3+}:\text{CNBZN}$ 材料, 其能级多结构复杂, 跃迁种类有基态吸收, 激发态吸收和能量传递上转换过程, 分析表明反斯托克斯荧光冷却实现的条件是入射光波长 $\lambda > 843 \text{ nm}$ ^[24], 镀减反膜的半导体二极管激光器正好可以实现 850 nm 左右的输出, 且功率可达几百毫瓦, Fernandez 小组采用的光源最大输出为 2.5 W, 上面分析得到利用腔增强可获得十到数百倍的增强因子, 因此增强后的光功率完全可达到制冷的工作要求. 反斯托克斯荧光制冷具有无机械振动, 无电磁辐射, 工作寿命长等优点, 本文的研究可为激光制冷实验负载能力的增加提供理论依据, 并进一步推进荧光制冷器的实用化和商业化^[25-27].

参考文献

- [1] Pringsheim P 1929 *Z. Phys.* **57** 739
- [2] Epstein R I, Buchwald M I, Edwards B C 1995 *Nature* **377** 500
- [3] Mungan C E, Buchwald M I, Edwards B C, Epstein R I, Gosnell T R 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 1030
- [4] Hoyt C W, Sheik-Bahae M, Epstein R I, Edwards B C, Anderson J E 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3600
- [5] Hoyt C W, Hasselbeck M P, Sheik-Bahae M, Epstein R I 2003 *J. Opt. Soc. Am. B* **20** 1066
- [6] Fernandez J, Mendioroz A, Garcia A J, Balda R, Adam J L, Arriandiaga M A 2001 *Opt. Mater.* **16** 173
- [7] Fernandez J, Mendioroz A, Garcia A J, Balda R, Adam J L 2001 *J. Alloys Compounds* **323-324** 239

- [8] Rayner A, Friese M E J, Truscott A G, Heckenberg N R, Rubinsztein-Dunlop H 2001 *J. Mod. Opt.* **48** 103
- [9] Rayner A, Hirsch M, Heckenberg N R, Rubinsztein-Dunlop H 2001 *Appl. Opt.* **40** 5423
- [10] Rayner A, Heckenberg N R, Dunlop H R 2003 *J. Opt. Soc. Am. B* **20** 1037
- [11] Gosnell T R 1999 *Opt. Lett.* **24** 1041
- [12] Lamouche G, Lavallard P, Suris R, Grousson R 1998 *J. Appl. Phys.* **84** 509
- [13] Xiao S G, Yang X L, Ding J W 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3812 (in Chinese)[肖思国, 阳效良, 丁建文 2009 物理学报 **58** 3812]
- [14] Wang Y L, Wang X L, Liang W H, Guo J X, Ding X C, Chu L Z, Deng Z C, Fu G S 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 127302 (in Chinese)[王英龙, 王秀丽, 梁伟华, 郭建新, 丁学成, 褚立志, 邓泽超, 傅广生 2011 物理学报 **60** 127302]
- [15] Fernandez J, Garcia-Adeva J A, Balda R 2012 *Optical Materials* **34** 579
- [16] Kim J, Kaviany M 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 074103
- [17] Fernandez J, Garcia A J, Balda R 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 033001
- [18] Heeg B, Rumbles G, Khizhnyak A, Debarber P A 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 3356
- [19] Wu J, Wang C L, Lin J T 2003 *Chin. Phys.* **12** 1120
- [20] Lozano B W, Araujo C B, Acioli L H, Messaddeq Y 1998 *J. Appl. Phys.* **84** 2263
- [21] Youhua J, Biao Z, Jianping Y 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 85
- [22] Cao W Y, He Y F, Chen Z, Yang W, Du W M, Hu X D 2013 *Chin. Phys. B* **22** 076803
- [23] Feng M X, Zhang S M, Jiang D S, Liu J P, Wang H, Zeng C, Li Z C, Wang H B, Wang F, Yang H 2012 *Chin. Phys. B* **21** 084209
- [24] Garcia-Adeva A J, Balda R, Fernandez J 2007 *Proc. of SPIE* **6461** 646102
- [25] Yen S T, Lee K C 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 054513
- [26] Kolar M, Klimovsky D G, Alicki R, Kurizki G 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 090601
- [27] Nemova G, Kasgyp R 2011 *Phys. Rev. A* **83** 013404

Theoretical analysis on cavity-enhanced laser cooling of Er³⁺-doped glasses*

Jia You-Hua^{1)†} Gao Yong¹⁾ Zhong Biao²⁾ Yin Jian-Ping⁽²⁾

1) (Science college, Shanghai Second Polytechnic University, Shanghai 201209, China)

2) (State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

(Received 27 October 2013; revised manuscript received 1 January 2014)

Abstract

In recent years, Er³⁺ doped CdF₂-CdCl₂-NaF-BaF₂-BaCl₂-ZnF₂ (CNBZN) glass has become one of the new materials in the field of laser cooling of solids. In this paper, using the theory of laser output and standing wave resonance, intracavity-and extracavity-enhanced laser cooling of Er³⁺-doped CNBZN glass are theoretically analyzed. Calculated results show that enhancement factor can achieve tens to hundreds of times. Moreover, two schemes are compared with each other, and the results show that for low material absorption, especially when the sample length is less than 0.3 mm, intracavity configuration has the advantage of high pumping power and high absorption. However, for high material absorption, especially when the sample length is longer than 3 mm, the extracavity configuration becomes a more efficient means for laser cooling. Finally, according to the operating wavelength and power requirements of Er³⁺-doped material, cavity enhancement can be realized experimentally using semiconductor diode laser.

Keywords: laser cooling, rare-earth ions, cavity enhancement

PACS: 42.60.Da, 42.15.Eq

DOI: 10.7498/aps.63.074203

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10974055), the Research and Innovation Project of Shanghai Municipal Education Commission, China (Grant No. 12YZ177), and the Young Teacher Training Program of Shanghai Municipal Education Commission, China (Grant No. egd11005).

† Corresponding author. E-mail: yhjia@sspu.edu.cn