文章编号:1001-5078(2013)10-1117-04 ·激光器技术·

半导体泵浦铷蒸气激光器理论与实验对比研究

李 琳[1,2],谭荣清[1],徐 程[1,2],李志永[1,2]
(1. 中国科学院电子学研究所高功率气体激光技术部,北京 100190;2. 中国科学院研究生院,北京 100190)

摘 要:以三能级速率方程理论为基础,结合具体实验,研究了单程泵浦铷蒸气激光器的输出特性。理论计算了铷激光器中泵浦光线宽、输出耦合率和铷室温度的最佳取值范围,以及输出功率与泵浦功率关系曲线,并分别与实验进行了对比。结果显示实验值与理论结果符合较好,验证了计算模型的适用性。

关键词:半导体泵浦;铷蒸气激光器;理论模型;实验研究
中图分类号:TN248.2 **文献标识码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2013.10.07

Theoretical and experimental study of diode pumped Rb vapor laser

LI Lin[1,2],TAN Rong-qing[1],XU Cheng[1,2],LI Zhi-yong[1,2]
(1. Department of High Power Gas Laser,Institute of Electronics,Chinese Academy of Sciences,Beijing 100190,China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences,Beijing 100190,China)

Abstract:The characteristics of an end-pumped single-pass Rb vapor laser is investigated by using three-level rate equations and correlated experiments. According to the theoretical model,the optimal ranges of pump linewidth,output coupler and Rb cell temperature are calculated. And the relationship between the output power and pump power is also studied. The calculated result corresponds with the experimental result very well,and the model's applicability is verified.

Key words:diode pumped;Rb vapor laser;theoretical model;experimental study

1 引 言

半导体激光泵浦碱金属蒸气激光器(Diode Pumped Alkali vapor Laser,DPAL)是一种新型的光泵浦气体激光器,增益介质主要为蒸气状态的钾(potassium,K)、铷(rubidium,Rb)或铯(cesium,Cs)。该激光器的特点有:极高的量子效率,热效应问题不突出;增益介质为气体,可采用流动散热管理热问题,光束质量好;激光波长处在大气的近红外传输窗口;泵浦源为半导体激光器,易于小型化;增益介质处于密封状态且无毒性,不会对环境造成污染。这些特点使得DPAL在国防和军事方面具有广泛的应用前景。自从2003年美国利弗莫尔国家实验室采用窄线宽的Ti:Sapphire激光器作为替代泵浦源获得铷激光输出以来[1],DPAL在高功率激光输出方面获得了迅速发展。2010年美国通用原子公司采用半导体激光器叠阵获得了207W的铷激光输出[2],光光转换效率接近10%。2012年2月,俄罗斯联邦核中心实验物理研究所报道了1 kW激光输出流动增益介质的铯蒸气激光器[3],是目前报道的最高连续DPAL激光输出功率。国内对DPAL的研究起步较晚,但也取得了一定的进展。2011年国防科大实现了国内首次出光[4],输出铷激光功率600 mW;中国科学院电子学研究所2012年获得了功率17.5 mW的基模铷激光输出,在此基础上,经过优化后获得了功率2.8 W的线偏振铷激光输出[5],光光转换效率21%,斜率效率32%。

到目前为止,国内外对于DPAL的实验研

作者简介:李 琳(1987-),女,硕士研究生,主要从事半导体泵浦碱金属蒸气激光器的研究。E-mail:lilin0406@126.com
收稿日期:2013-04-12;**修订日期**:2013-04-22

究[6-9]及理论分析[10-14]均进行了较多报道,但是还缺乏将理论分析计算结果与激光输出实验相结合的研究报道。本文建立了一个三能级物理模型,根据实验参量和估算,确立了求解模型所需的各种微观碰撞过程的速率系数和辐射跃迁等相关数据,描述了单程端面半导体泵浦铷蒸气激光器的激光特性,并与实验结合进行验证,结果表明实验值与理论值相接近。

2 实验设计与理论模型的建立

实验中的半导体激光器线阵有 19 个发光单元,经压窄线宽和光束整形后,光束经偏振分光棱镜(PBS)反射后进入长约 7 mm 的铷蒸气玻璃泡,焦点位于泡体中心附近,铷泡充入 79 kPa 的甲烷作为缓冲气体。泵浦光相对于 PBS 为 S 偏振,铷激光为 P 偏振。谐振腔为腔长约 105 mm 的稳定腔,输出镜为平面镜,全反镜为球面镜,曲率半径 200 mm。整体实验光路如图 1 所示。

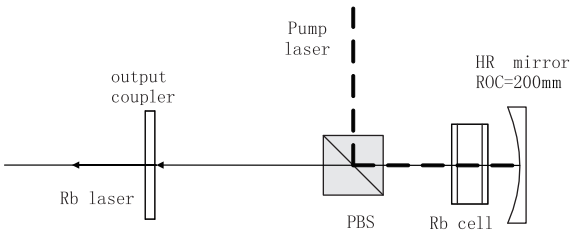


图 1 激光器光路结构图

根据上述实验装置的光路结构图,简化出了单程端面泵浦铷蒸气激光器的原理图,如图 2 所示。泵浦光从左至右单程通过铷蒸气室,设铷室两端窗口片对泵浦光的透过率为 T_p。激光在谐振腔中振荡,设铷室窗口片对激光的透过率为 T_l,谐振腔一端是全反射镜,对激光的反射率为 R_l,激光最终通过谐振腔另一端的输出耦合镜输出,输出耦合镜的反射率为 R_{oc}(输出耦合率 $T_{oc}=1-R_{oc}$)。

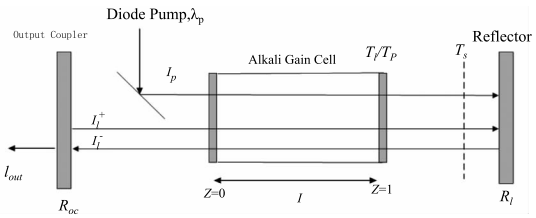


图 2 单程端面泵浦碱金属蒸气激光器原理图

DPAL 是三能级系统,基态能级为 $2S_{1/2}$,激光上能级为 $2P_{1/2}$,抽运高能级为 $2P_{3/2}$。假设入射的泵浦光功率密度是均匀的,三能级速率方程为:

$$\frac{dn_1(z)}{dt}=-\left[n_1(z)-\frac{1}{2}n_3(z)\right]\times\int_0^\infty\frac{\sigma_{13}(\nu)\times I_p(z,\nu)}{h\nu_p}d\nu+\sigma_{21}\left[n_2(z)-n_1(z)\right]\frac{I_l^+(z)+I_l^-(z)}{h\nu_l}+\frac{n_2(z)}{\tau_{21}}+\frac{n_3(z)}{\tau_{31}} \quad (1)$$

$$\frac{dn_2(z)}{dt}=-\sigma_{21}\left[n_2(z)-n_1(z)\right]\frac{I_l^+(z)+I_l^-(z)}{h\nu_l}+\gamma_{mix}\left[n_3(z)-2exp(-\frac{\Delta E}{k_BT})n_2(z)\right]-\frac{n_2(z)}{\tau_{21}} \quad (2)$$

$$\frac{dn_3(z)}{dt}=\left[n_1(z)-\frac{1}{2}n_3(z)\right]\times\int_0^\infty\frac{\sigma_{13}(\nu)\times I_p(z,\nu)}{h\nu_p}d\nu-\gamma_{mix}\left[n_3(z)-2exp(-\frac{\Delta E}{k_BT})n_2(z)\right]-\frac{n_3(z)}{\tau_{31}} \quad (3)$$

$$\frac{dI_p(z,\nu)}{dt}=-\left[n_1(z)-\frac{1}{2}n_3(z)\right]\sigma_{13}(\nu)I_p(z,\nu) \quad (4)$$

$$\frac{dI_l^\pm(z)}{dt}=\pm\left[n_2(z)-n_1(z)\right]\sigma_{21}I_l^\pm(z) \quad (5)$$

各能级粒子数保持守恒,满足条件:

$$n_1(z)+n_2(z)+n_3(z)=n(z) \quad (6)$$

总的铷粒子数密度由下式决定,与铷室温度有关[15]:

$$n(z)=\frac{133.322}{k_BT}\times10^{2.881+4.312-\frac{4040}{T}} \quad (7)$$

$n_1(z)$,$n_2(z)$,$n_3(z)$分别为增益介质某一位置 z 处的 $2S_{1/2}$、$^2P_{1/2}$、$^2P_{3/2}$能级粒子数密度,$\sigma_{31}(\nu)$、σ_{21}分别为泵浦光吸收截面和激光发射截面,ν_p、ν_l 分别为泵浦光频率和激光频率,τ_{31}、τ_{21} 分别为能级$^2P_{3/2}$、$^2P_{1/2}$的寿命,ΔE 为$^2P_{3/2}$和$^2P_{1/2}$能级之间的能量差,γ_{mix}为$^2P_{3/2}$和$^2P_{1/2}$能级之间的精细结构混合速率(与充入烷烃类缓冲气体压强有关),h 为普朗克常数,k_B 为波尔兹曼常数,T 为铷蒸气温度,$I_p(z,\nu)$为增益介质某一位置 z 处某一频率的泵浦光功率密度,$I_l^\pm(z)$分别对应增益介质某一位置 z 处向前传播和向后传播的激光功率密度。稳态情况下,联立式(1)~(7),通过迭代计算,在给定的参数条件下,我们可以求出输出激光功率 P_{out}。

3 计算结果与分析

3.1 泵浦光线宽对泵浦光吸收功率输出激光功率的影响

计算中根据实验情况[5]选取参数,为:铷蒸气温度 $T=418$ K,充入甲烷压强为 $P_{methane}=600$ Torr,增益介质长度为 $l=7$ mm,输出耦合镜反射率为 $R_{oc}=0.3$,泵浦光功率为 $P_{in}=13$ W。图 3 显示的泵

浦光线宽对泵浦光吸收功率和输出激光功率的影响。由于铷原子本身 D_2 线的吸收线宽很窄，而市售半导体激光器的线宽很宽，为有效实现铷原子的泵浦，需要对半导体激光器的线宽进行压窄[16]。从图3中可以看到，在充入甲烷600 Torr的情况下，泵浦线宽越窄，对泵浦光的吸收功率越大，同时输出的激光功率越大。为达到较好的实验结果，泵浦光线宽不能大于0.15 nm。实验中对半导体激光器的线宽压窄到了0.13 nm，但考虑到实验的可操作性和安全性，泵浦光线宽压窄到0.13 nm是可行的。

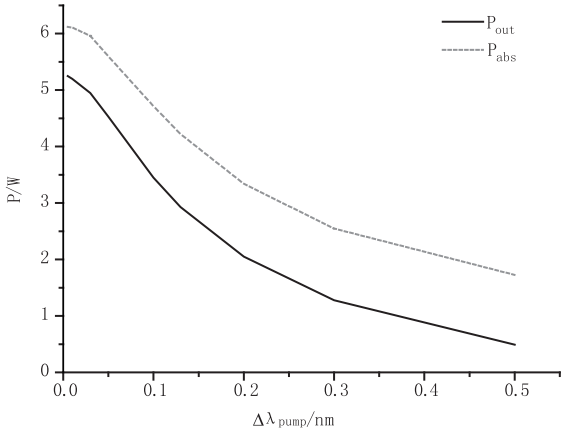


图3　泵浦光线宽对泵浦光吸收功率和输出激光功率的影响

3.2　输出耦合率对输出激光功率的影响

图4显示的是在实验条件下，输出耦合率对输出激光的影响。可以看到，随着输出耦合率的增加，输出激光功率不断增大，达到最大值（此时 T_{oc} = 0.7）后，逐渐减小。实验中输出耦合率为0.2，0.5，0.7时的输出激光分别为1.5 W，2.5 W，2.8 W，也是呈增长趋势，从理论计算中可以预测，当输出耦合率大于0.7时反而会引起输出激光功率的减小。

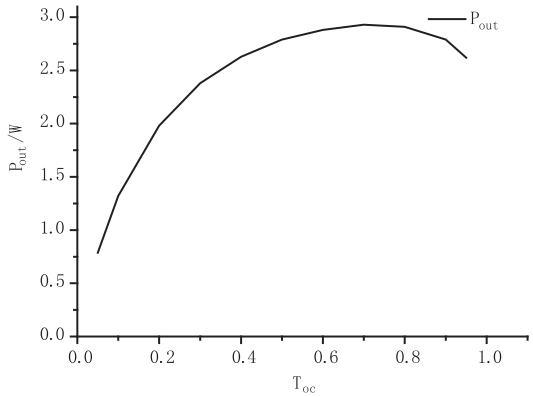


图4　输出耦合率对输出激光功率的影响

3.3　铷室温度对输出激光功率的影响

图5显示的是铷室温度理论值与实验值的对比，可以看到，在410 K之前实验值与理论值符合较好，但实验值的最佳温度为418 K，而计算显示的最佳温度为432 K。由于实验中测量的是铷室外壁的温度，理论计算的是铷室内部铷蒸气的温度，而铷室内部温度由于热效应等问题会比铷室外壁的温度高，因此计算显示的432 K也是合理的。

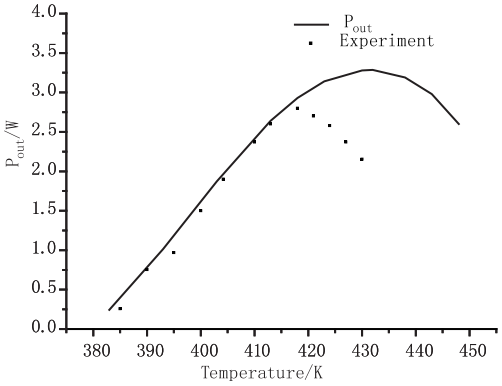
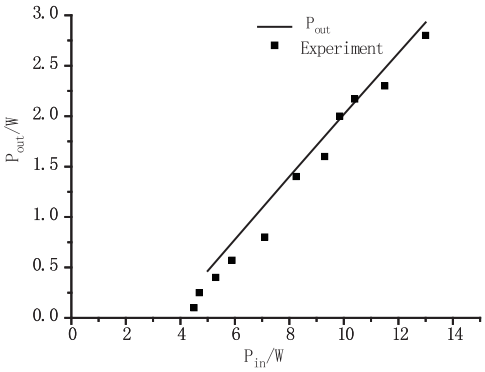


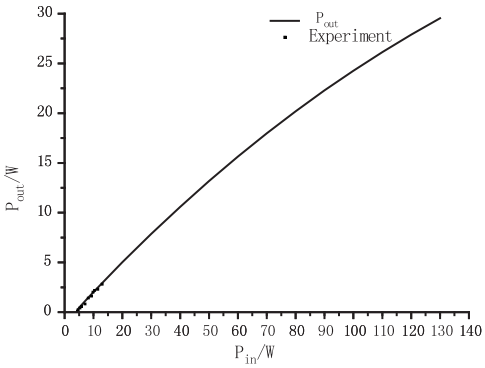
图5　铷室温度理论值与实验值的对比

3.4　泵浦光功率对输出激光功率的影响

图6显示的泵浦光功率对输出激光功率的影响。从图6(a)可以看到，在本文实验条件下，实验值与理论计算值很接近，考虑到理论模型的简化和参数设置的误差，实际的实验结果是在理论值附近浮动的；图6(b)中根据理论值可以预测，实验值是处在线性增长区，泵浦光为100 W时输出铷激光功率可达25 W，若能采用更大的泵浦光功率将可以获得更大的激光输出功率。



(a)泵浦光功率对输出激光的影响实验与理论的对比



(b) 泵浦光功率对输出激光的影响理论预测

图6　泵浦光功率对输出激光功率的影响

4 总 结

本文以速率方程理论为基础,研究了单端泵浦铷蒸气激光器的激光特性。理论计算了泵浦光线宽、输出耦合率、铷室温度和泵浦光功率对输出激光的影响,并与实验结果进行对比。结果显示,为获得较大的激光输出功率,泵浦光线宽不能大于0.15 nm,由于实验中考虑到由线宽压窄带来的功率损耗较大,因此实验条件中泵浦光线宽为0.13 nm是可行的;输出激光功率随输出耦合率的增大先增大,到达最大值后减小,本文实验条件下,输出耦合率为0.7时,输出激光为最大;存在使输出激光功率达到最大的最佳温度,由于实验条件的限制,实验中的最佳温度比理论计算值低;在线性增长区中,激光功率随泵浦光功率的增大而增大,并且实验值与理论计算值相吻合,从计算结果中可以看到,若能采用更大的泵浦光功率将可以获得更大的激光输出功率。该理论模型能够使实验值与理论计算结果很好的相结合,对实验设计起指导和预测作用。

参考文献:

[1] W F Krupke, R J Beach, V K Kanz, et al. Resonance transition 795 nm rubidium laser[J]. Opt Lett, 2003, 28(23):2336-2338.

[2] J Zweiback, A Komashko, W F Krupke. Alkali vapor lasers[C]//Proc of SPIE. 2010:68740G.

[3] A V Bogachev, S G Garanin, A M Dudov, et al. Diode-pumped cesium vapor laser with closed-cycle laser-active medium circulation [J]. Quantum Electronics, 42(2): 95-98, 2012.

[4] Yang Zining, Wang Hongyan, Hua Weihong, et al. Diode pumped rubium vapor laser[J]. High power Laser and Particle Beams, 2011, 23(09): 2273 - 2274. (in Chinese)
杨子宁,王红岩,华卫红,等. 半导体泵浦铷蒸气激光器国内首次出光[J]. 强激光与粒子束,2011,23(09):2273-2274.

[5] Xu Cheng, Tan Rongqing, Li Zhiyong, et al. 2.8 W linearly polarized output of Rubidium vapor laser with diode pumping[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(1): 0102009. (in Chinese)
徐程,谭荣清,李志永,等. 半导体抽运铷蒸气输出2.8 W线偏振铷激光[J]. 中国激光,2013,40(1):0102009.

[6] B V Zhdanov, J SellandR J Knize. Multiple laserdiode array pumped Cs laser With 48W output power[J]. Electronics Letter, 2008, 44(9):582-583.

[7] B V Zhdanov, A Stooke, G Boyadjian, et al. 17 Watts continuous wave rubidium laser[C]. CLEO/QELS, 2008, 1-9:292-293.

[8] B V Zhdanovl, M K Shaffer, J Sell. Transverse pumped cs vapor laser[J]. Proc of SPIE, 2009, 7196:71960F01-71960F05.

[9] B V Zhdanov, M K Shaffer, R J Knize. Cs laser with unstable cavity transversely pumped by multiple diode lasers [J]. Optics Express, 2009, 17(17):14767-14770.

[10] R J Beach, W F Krupke, V K Kanz, et al. End-pumped continuous wave alkali vapor lasers: experiment, model, and power scaling[J]. J Opt Soc Am B, 2004, 21(12): 2151-2163.

[11] G D Hager, G P Perram. A three-level analytic model for alkali metal vapor lasers: part I. Narrowband optical pumping[J]. Appl Phys B, 2010, 101:45-56.

[12] Yang Zining, Wang Hongyan, Lu Qisheng, et al. Theoretical model and novel numerical approach of a broadband optically pumped three-level alkali vapour laser[J]. J Phys B: At Mol Opt Phys, 2011, 44:085401.

[13] Yang Zining, Wang Hongyan, Lu Qisheng, et al. Modeling, numerical approach, and power scaling of alkali vapor lasers in side-pumped configuration with flowing medium. J Opt Soc Am B, 2011, 28(6):1353-1364.

[14] Wang Yajuan, Pan Bailiang, Qi Zhu, et al. A kinetic model for diode pumped Rubidium vapor laser[J]. Opt Commun, 2011, 284(16):4045-4048.