

·光电器件与材料·

## 缓冲气体压力对铷原子吸收特性的影响

于祥升<sup>1,2</sup>, 王卫民<sup>2</sup>, 陈兴无<sup>2</sup>

(1.中国工程物理研究院研究生部,北京 100088;2.中国工程物理研究院应用电子学研究所,四川 绵阳 621900)

**摘要:**铷原子吸收线宽很窄,通过充入定量缓冲气体,可以加宽铷原子的泵浦吸收线宽,从而可以提高铷原子对泵浦光的吸收效率。通过计算模拟,找到入射泵浦光谱宽、入射泵浦强度和缓冲气体压力之间的对应关系,找到最佳的实验工作条件,最终实现铷原子对离泵浦中心频率一定范围内的泵浦吸收效率很高,同时保证在泵浦谱宽范围内的总泵浦吸收效率也很高。模拟结果显示:随着缓冲气体压力的增大,铷原子吸收线宽不断增加,但是泵浦光的总吸收效率下降的并不明显。

**关键词:**原子吸收线宽;吸收效率;模拟;中心频率

中图分类号:TN248

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2012)03-0046-04

## Influence of Buffer Gas Pressure on Rubidium Atomic Absorption

YU Xiang-sheng<sup>1,2</sup>, WANG Wei-min<sup>2</sup>, CHEN Xing-wu<sup>2</sup>

(1. Graduate School of China Academy of Engineering and Physics, Beijing 100088, China;

2. Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering and Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The absorption linewidth of the rubidium atom is very narrow, the pump absorption linewidth of the rubidium atom can be wider by filling a ration of buffer gas, and the absorption rate of the pump light can be also improved. The correspondence among the incident pump spectral width, incident pump intensity and the buffer gas pressure is gained, the best working conditions are also found. The high pump absorption efficiency from the center frequency for rubidium atom can be achieved, the total pump absorption efficiency within the spectral width can be also ensured. The simulation results show that with the increasing of the buffer gas pressure, the absorption linewidth of the rubidium atom increases, but the total absorption efficiency of the pump light decreases unobviously.

**Key words:** atomic absorption linewidth; absorption efficiency; simulation; center of frequency

铷蒸汽激光器是以饱和铷蒸汽为工作物质的一种新型高功率近红外激光器,它既具有气体激光器良好的传热、散热特性,也具有比固体激光器高的量子效率(K, 99.6%; Rb, 98.1%; Cs, 95.3%),极低的产热率,可以实现高质量、高功率的激光输出。铷蒸汽激光器发展中的主要障碍<sup>[1-5]</sup>是:原子吸收线宽与泵浦线宽相比很窄(大致为泵浦光线宽的千分之一),原子对泵浦谱线无法形成有效的吸收。

在铷金属蒸汽激光器发展过程中,人们已经认

识到充入一定量的缓冲气体可以加宽铷原子的吸收效率<sup>[3,4]</sup>,通过谱线的碰撞加宽,增加了铷原子吸收的有效泵浦谱宽,同时又提高了有效抽运率,即泵浦吸收效率。然而太高的缓冲气体压力会引起有效泵浦谱宽范围内谱线吸收系数的降低,对整个系统的物理设计也存在各种难度。

通过Ti:Sapphire激光器端面入射蒸汽管,模拟在不同缓冲气体(He)压力条件下,铷原子对泵浦光的有效泵浦谱宽和入射泵浦强度。

## 1 铷蒸汽激光器物理模型

铷蒸汽激光器物理模型如图1所示,不锈钢蒸汽管长13 cm,内直径2.5 cm,通过抽气过程获得真空度 $10^{-4}$  Pa环境,之后往系统中充入铷( $\text{Rb}^{85}$ )的饱和蒸汽,实验中铷的工作温度在400 K左右,按需要充入几个atms压力的He,蒸汽室采用缠绕烘烤带的方式加热,由电热偶测温。

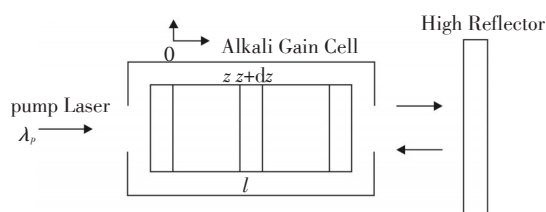


图1 物理模型

其中蒸汽管设计主要考虑:(1)抗腐蚀:铷原子化学性质很活泼,在高温条件下可与很多物质反应,蒸汽管适合采用不锈钢或者镍材料制造,在200℃内也可用碱金属含量低的玻璃材料,法兰之间的连接宜用金属垫密封;(2)耐高压:包括管壁厚度设计,法兰与蓝宝石窗口封接,管道应该保持一定的柔韧性等。

传输微分方程为

$$I(z) + dI(z) = I(z)e^{\sigma_{31}(n_3 - 2n_1)dz} \quad (1)$$

其中抽运光吸收横截面积 $\sigma_{31}(\nu)$ 为

$$\sigma_{31}(\nu) = \sum_F \sum_{F'} \sigma_{5S_{3/2}(F) \rightarrow 5P_{3/2}(F')}(\nu) \frac{g(F')}{\sum_{F'} g(F')} \quad (2)$$

式中, $F, F'$ 分别是 $5P_{3/2}$ 和 $5S_{3/2}$ 超精细结构的总角动量量子数, $g(F') = 2F' + 1$ 为 $5S_{3/2}(F')$ 能级的统计权重<sup>[8-10]</sup>。在气体工作物质中,均匀加宽来源于自然加宽和碰撞加宽。由于实验过程充入的缓冲气体量比较大,碰撞加宽要远远大于自然加宽,所以均匀加宽主要由碰撞加宽引起,均匀加宽线型函数 $g(\nu, \nu_0)$

$$g(\nu, \nu_0) = \frac{\frac{\Delta\nu}{2\pi}}{\left(\nu - \nu_0 + \sum_i \delta_i P_i\right)^2 + \left(\frac{\Delta\nu}{2}\right)^2} \quad (3)$$

其中, $\Delta\nu$ 为碰撞线宽。

## 2 铷原子吸收线宽计算与缓冲气体选择

### 2.1 铷原子吸收线宽计算

由于铷蒸汽原子热运动发出的辐射多普勒频移引起的多普勒加宽(Doppler),加宽由下式决定

$$\Delta\nu_D = \frac{1}{\lambda_0} \left( \frac{8KT}{M} \ln 2 \right)^{1/2} \quad (4)$$

式中, $M$ 为铷原子量; $\lambda_0$ 为铷原子吸收谱线中心波长; $T$ 为操作温度;单位为K。设定操作温度在160℃条件下,得多普勒加宽 $\Delta\nu_D = 0.54$  GHz。

上述计算看出,与商用半导体输出谱线宽(250 GHz或更高)相比,铷原子吸收线宽很窄。通过谱线碰撞加宽可以解决此问题,理论计算如要满足线宽匹配,需要充入12 atms的氦气,计算公式由下式给出

$$\Delta\nu_1 = \gamma P \quad (5)$$

$\gamma = 2.7 \times 10^{-4}$  GHz/Pa为铷原子与氦原子之间的碰撞加宽系数, $P$ 为充入氦气的压力。

### 2.2 缓冲气体选择

铷( $\text{Rb}$ )最外层只有一个电子,化学性质极为活泼。可以与所有的非金属(氮气和惰性气体除外)元素起反应。在实验操作温度下,铷显熔化状,与氧气自燃,也可形成臭氧氧化物。与氢可生成氢化物,是碱金属氢化物中最不稳定的一个。与一氧化碳反应即得金属羰基化物( $\text{RbCO}$ )。所以缓冲气体只从少数活性很小的元素中选取。

氮气作为缓冲气体, $\text{Rb}$ 原子受激发射的光子能量绝大部分转换成氮气的动能,造成大的激光损耗,所以一般选用惰性元素作缓冲气体,最初选用He气体,He气体与Rb蒸汽碰撞, $^3\text{He}$ 元素与同位素 $^4\text{He}$ 相比有更大的优越性,前者 $^3\text{P}$ 能级的混合速率是后者的1.5倍;烷类(甲烷等)能加快 $^5\text{P}_{3/2} \rightarrow ^5\text{S}_{1/2}$ 能级间的无辐射速率,一般情况下不加缓冲气体, $\text{Rb}$ 原子 $^5\text{P}_{3/2} \rightarrow ^5\text{S}_{1/2}$ 能级间自发辐射严重,1,2能级不能产生有效粒子数反转。但是在激光器操作温度下,烷类气体易与铷原子发生反应,生成碱金属水合物和石墨。这两种物质会吸附室壁上,特别是蓝宝石窗口处,吸收和散射抽运光,造成大的增益损耗。表1所示为铷原子的一些基本特性参数。

## 3 模拟结果与讨论

计算模拟在近衍射极限条件下的介质对泵浦光吸收,泵浦光光谱线看成矩形线型函数。入射泵浦功率密度随入射光束口径的改变而改变。分别模拟在不同缓冲气体压力条件下的介质对入射泵浦光的吸收效率。

表1 碱金属铷与氦气的能级混合速率和碰撞加宽系数

基本特性参数	Rb
D <sub>2</sub> pump wavelength (in vacuum)/nm	780.24
D <sub>1</sub> laser wavelength (in vacuum)/nm	794.98
<sup>2</sup> P energy splitting/(cm <sup>-1</sup> )	237
Quantum energy defect (heating ratio)/(%)	1.85
Helium <sup>2</sup> P mixing rate(×10 <sup>9</sup> sec <sup>-1</sup> atm <sup>-1</sup> )	0.045
Helium <sup>2</sup> P <sub>3/2</sub> broadening rate/(nm/atm)	0.045
Helium <sup>2</sup> P <sub>1/2</sub> broadening rate/(nm/atm)	0.036
D <sub>2</sub> pump transition cross-section/(×10 <sup>-13</sup> cm <sup>2</sup> ),(1 atm He,STP)	7.6
D <sub>1</sub> pump transition cross-section/(×10 <sup>-13</sup> cm <sup>2</sup> ),(1 atm He,STP)	5.4

为了满足泵浦中心频率处铷原子对泵浦光有大的吸收效率,对应的泵浦光吸收系数 $g_{31}$ (cm<sup>-1</sup>)大致小于数值-0.2(如图2所示),铷原子吸收线宽越小,对应的泵浦光吸收系数越小,为了尽可能地保证激光基模与泵浦模式匹配,铷原子吸收线宽不能太小,选择泵浦吸收系数接近-0.2比较合适。不同泵浦光吸收系数条件下,铷原子吸收线宽与入射泵浦光强度之间有着最佳的对应关系如图3,假设入射泵浦光强度为 $I_{pin}=50$  kW/cm<sup>2</sup>时,对应的最佳原子吸收线宽分别为 $\Delta\nu_1=118$  GHz( $g_{31}=-0.2$ ), $\nu_1=45.3$  GHz( $g_{31}=-0.3$ ), $\nu_1=8.9$  GHz( $g_{31}=-0.4$ )。

在上述满足条件下( $\Delta\nu_1=118$  GHz, $I_{pin}=50$  kW/cm<sup>2</sup>),泵浦谱宽( $\Delta\nu$ )的增加,会导致泵浦谱宽范围内原子总吸收效率( $\eta'$ )的降低,但是铷原子对泵浦光的吸收强度在不断增加,在泵浦谱宽 $\Delta\nu=500$  GHz之后泵浦光吸收强度的变化比较缓慢,如图3。主要原

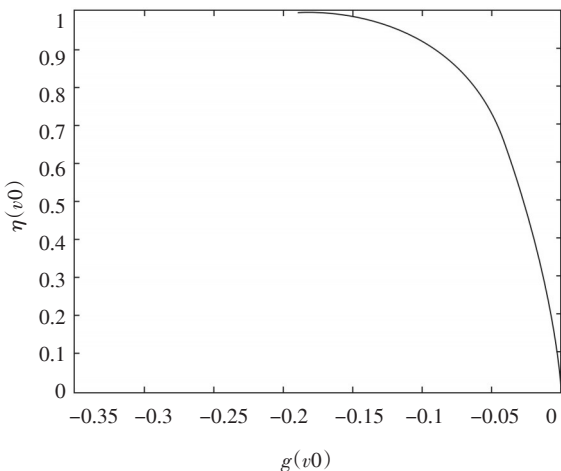


图2 中心频率( $\nu_0$ )处,泵浦吸收效率与吸收系数的关系

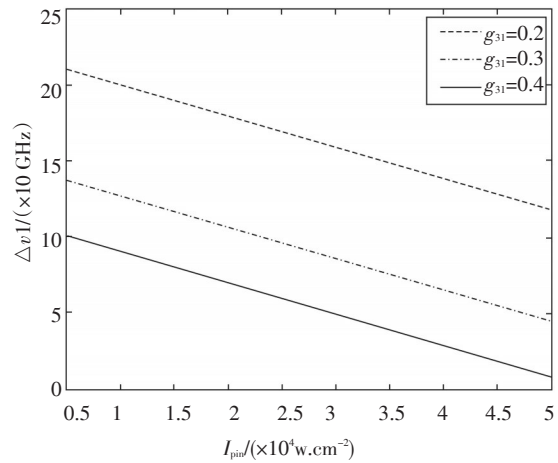
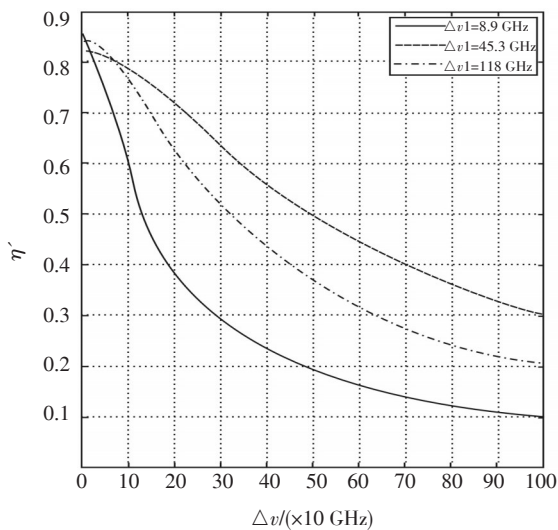


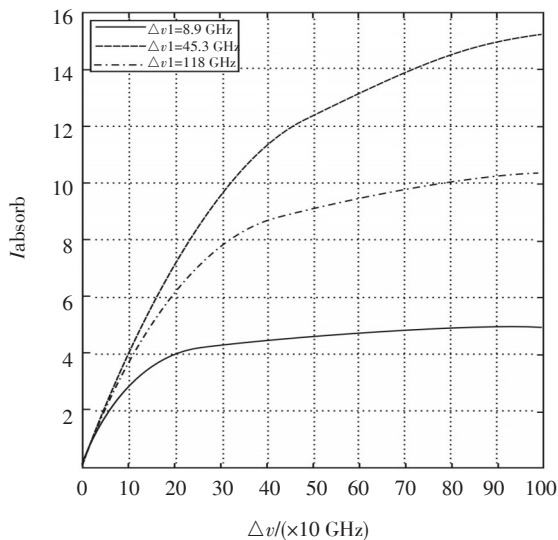
图3 不同泵浦吸收系数下,入射泵浦光强度对应的最佳原子吸收线宽

因是铷原子在泵浦谱线远翼的受激吸收横截面积很小造成的。在泵浦谱宽 $\Delta\nu=500$  GHz时,铷原子对泵浦光吸收效率大致为55%。同理,铷原子吸收线宽降低到8.9 GHz,入射泵浦光强度不变,在泵浦谱宽 $\Delta\nu=130$  GHz时,铷原子对泵浦光吸收效率大致为60%。上述两者比较,随铷原子吸收线宽的变化,铷原子对有效泵浦谱宽的吸收范围变化比较明显,而泵浦光总的吸收效率变化并不是太明显。

考虑到高功率泵浦源线宽很宽,需要对铷原子线宽进行加宽,使泵浦源的泵浦谱宽尽量处在有效泵浦谱宽范围内,以保持铷原子对泵浦光高的吸收率。在泵浦谱宽 $\Delta\nu=500$  GHz时,只要铷原子的吸收线宽达到 $\Delta\nu_1=118$  GHz,就会产生较高的泵浦吸收率。



(a) 总泵浦吸收效率



(b) 总泵浦吸收能量

图4 总泵浦吸收效率和吸收能量与泵浦谱宽之间的对应关系

## 4 结 论

对高效率铷蒸汽激光器的泵浦谱宽进行了一定的模拟计算,模拟结果表明:在蒸汽温度 400 K,蒸汽

管长度 13 cm 条件下,铷原子吸收线宽对应着最优的泵浦有效吸收谱宽,在泵浦谱宽范围内,铷原子吸收线宽的增加可以有效提高铷原子的总泵浦吸收能量,但对铷原子总泵浦吸收效率影响并不明显。

## 参考文献

- [1] Beach R J, Krupke W F. End-pumped continuous-wave alkali vapor lasers: experiment, model, and power scaling[J]. Journal of the Optical Society of America, 2004, 21 (12): 2151-2163.
- [2] Zweiback J, Komashko A, Krupke W F. Alkali vapor lasers [C]// Proc of SPIE, 2010: 68740G.
- [3] Page R H, Beach R J, Kanz V K, et al. Multimode-diode-pumped gas (alkali-vapor) laser[J]. Opt. Lett, 2006, 31 (3): 353-355.
- [4] Gordon D H, Glen P P. Extended saturation analysis and analytical model of diode pumped alkali lasers[C]//Proc of SPIE, 2010: 75810J.
- [5] 余建华, 祝强, 谢武, 等. 高功率半导体激光抽运碱金属蒸气激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(7): 46-51.
- [6] Zhdanov B V, Knize R J. Diode-pumped 10 W continuous wave Cesium laser[J]. Opt.Lett., 2007, 32(15):2167-2169.
- [7] 周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [8] Koechner W. Solid-State Laser Engineering[M]. Fifth ed. 2005.
- [9] 杨子宁, 王红岩, 陆启生, 等. 光谱特性对半导体泵浦碱蒸气激光器性能的影响[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(10): 2257-2260.
- [10] Tam A, Moe G, Happer W. Particle formation by resonant laser light in alkali-metal vapor[J]. Phys.Rev.Lett, 1975, 35: 1630-1633.
- [11] Zhdanov B V, Ehenreich T, Knize R J. Narrowed external cavity laser diode array[J]. Electronics Letters, 2007, 43 (4): 221-222.
- [12] Zhdanov B V, Shaffer M K, Knize R J. Demonstration of a diode pumped continuous wave Potassium laser[J]. Proc. Of SPIE, 2006, 79:1-6.

## 变更声明

《光电技术应用》期刊投稿电子信箱变更为 nloe@vip.163.com, 原投稿电子信箱已停止使用, 特此声明。