

半导体泵浦铷蒸气激光器阈值特性*

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. 中国科学院大学, 北京 100190)

摘 要: 以速率方程为基础建立理论模型, 采用迭代计算方法, 对单程端面泵浦铷蒸气激光器的阈值特性进行了详细研究。研究表明, 铷室温度和长度对阈值泵浦功率密度的影响具有等价性, 存在使阈值功率密度达到最小的最佳铷室长度与温度组合。泵浦光线宽对阈值功率密度的影响基本呈线性; 泵浦光线宽越宽, 泵浦光中心波长与铷原子吸收波长的偏移量对阈值功率密度的影响越小; 存在最佳的铷原子吸收线宽, 使阈值功率密度达到最小; 为减小阈值功率密度, 铷室窗口片应尽量考虑镀膜, 谐振腔输出耦合率不宜大于 80%。

关键词: 半导体泵浦; 铷蒸气激光器; 阈值功率密度

中图分类号: TN248.2 **文献标志码:** A **doi:**10.3788/HPLPB201426.021004

半导体泵浦碱金属蒸气激光器(DPAL)具有量子效率高(钾 99.6%、铷 98.1%、铯 95.3%)、光束质量好、热效应小等特点, 是一种具有巨大潜力的新型激光器。自从 2003 年美国 LLNL 采用窄线宽的 Ti:Sapphire 激光器作为替代泵浦源获得铷激光的输出^[1], 半导体泵浦碱金属激光器的研究得到了迅速发展。2008 年美国空军学院获得了峰值功率 48 W 的铯激光^[2]和连续 17 W 的铷激光^[3]; 2010 年美国通用原子公司采用半导体激光器叠阵作为泵浦源获得了 207 W 的铷激光输出, 光-光转换效率接近 10%^[4]。国内对 DPAL 的实验研究起步较晚, 但也取得了一定的进展。2011 年国防科学技术大学实现了国内首次出光^[5], 激光器输出功率 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, 经过优化后近期获得了功率 2.8 W 的线偏振铷激光, 光光转换效率 21%, 斜率效率 32%^[6]。理论研究方面, 2004 年 R. J. Beach 等人^[7]对端面连续泵浦碱金属激光器的理论模型进行了描述; 2009 年美国空军研究院的 G. D. Hager 等人用三能级模型进行了深入研究^[8]。国内的国防科学技术大学、浙江大学等也分别对端面泵浦和侧面泵浦进行了理论分析^[9-11]。但是, 目前的理论研究主要集中在输出激光特性方面, 还缺乏在激光阈值特性方面的研究。本文建立了单程端面泵浦铷蒸气激光器的理论模型, 分析了各参数对阈值的影响。

1 理论模型

对于铷原子, 三能级结构如图 1 所示。 $5^2S_{1/2}$ 为基态能级, $5^2P_{1/2}$, $5^2P_{3/2}$ 为自旋-轨道相互作用而劈裂的激发态能级, $5^2S_{1/2} - 5^2P_{3/2}$, $5^2P_{1/2} - 5^2S_{1/2}$ 分别是 D_2 , D_1 谱线, 称为抽运跃迁和激光跃迁。

单程端面泵浦碱金属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, 输出耦合镜反射率为 R_{oc} , 输出耦合率 $T_{oc} = 1 - R_{oc}$ 。

假设入射的泵浦光功率密度是均匀的, 三能级速率方程为

$$\begin{aligned} \frac{dn_1(z)}{dt} = & -[n_1(z) - \frac{1}{2}n_3(z)] \int_0^\infty \frac{\sigma_{13}(\nu) I_p(z, \nu)}{h\nu_p} d\nu + \\ & \sigma_{21}[n_2(z) - n_1(z)] \frac{I_1^+(z) + I_1^-(z)}{h\nu_1} + \frac{n_2(z)}{\tau_{21}} + \frac{n_3(z)}{\tau_{31}} \end{aligned} \quad (1)$$

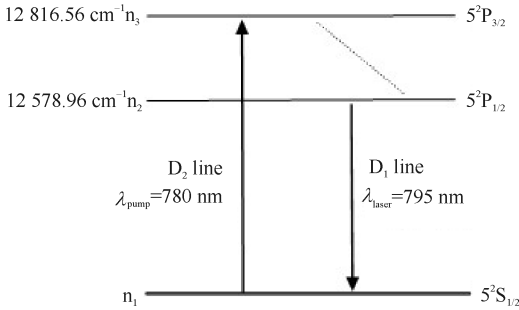


Fig. 1 Energy levels of Rb vapor laser
图 1 铷蒸气激光器能级示意图

* 收稿日期: 2013-03-12; 修订日期: 2013-06-19
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; lilin0406@126.com。
通信作者: 谭荣清(1966—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事气体激光技术及其应用的研究; rongqingtan@163.com。

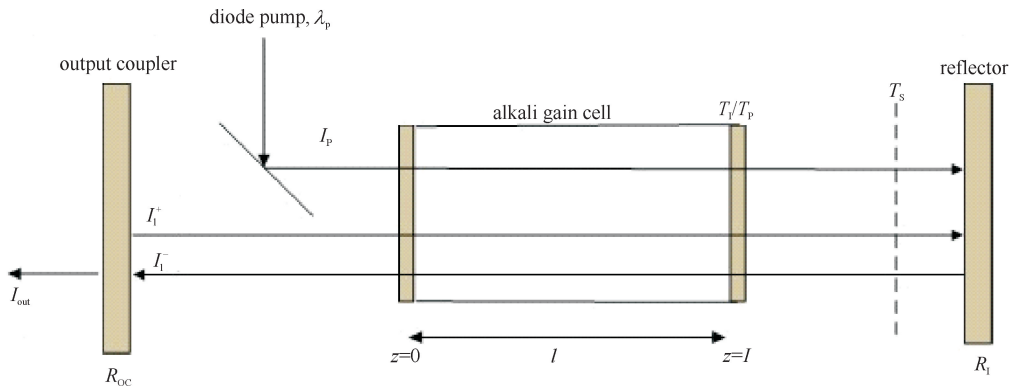


Fig. 2 Schematic diagram of an end-pumped alkali vapor laser in single-pass configuration

图 2 单程端面泵浦碱金属蒸气激光器原理图

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

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

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

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

式中: $n_1(z)$, $n_2(z)$, $n_3(z)$ 分别为增益介质 z 处的 $^2S_{1/2}$, $^2P_{1/2}$, $^2P_{3/2}$ 能级粒子数密度; 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; σ_{21} 为原子中心频率处的发射截面; $\sigma_{13}(\nu)$ 为某一频率的原子吸收截面; 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 为玻耳兹曼常数; T 为铯蒸气温度; $I_p(z, \nu)$ 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。

各能级粒子数保持守恒, 满足条件

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

总的铯粒子数密度由式(7)决定, 与铯室温度有关^[12], 即

$$n(z) = 133.322/(k_B T) \times 10^{2.881+4.312-4040/T} \quad (7)$$

其中 $\sigma_{13}(\nu)$ 为吸收谱对应某一频率的吸收截面, 定义为

$$\sigma_{13}(\nu) = \frac{f_3}{f_1} \frac{c^2}{8\pi\tau_{31}\nu_{D_2}^2} g(\nu) \quad (8)$$

式中: ν_{D_2} 是铷原子 D_2 吸收线的中心频率; f_3 和 f_1 分别是能级 $^2P_{3/2}$ 和 $^2S_{1/2}$ 的统计权重, 分别为 4 和 2。

$$g(\nu) = \frac{\frac{\Delta\nu_{D_2}}{2\pi}}{(\nu - \nu_{D_2})^2 + \left(\frac{\Delta\nu_{D_2}}{2}\right)^2} \quad (9)$$

式中: $\Delta\nu_{D_2}$ 为铷原子 D_2 吸收线线宽。

$$\Delta\nu_{D_2} = \frac{1}{2\pi\tau_{31}} + \gamma_M(T)p_M + \gamma_{He}(T)p_{He} \quad (10)$$

式中: $\gamma_M(T)$ 是与温度有关的甲烷与铷蒸气碰撞加宽率; p_M 是常温下充入甲烷气体的压强; $\gamma_{He}(T)$ 是与温度有关的氦气与铷蒸气碰撞加宽率; p_{He} 是常温下充入氦气的压强。

泵浦光假设为高斯线型

$$I_p(z,\nu)=I_p(z)\frac{2}{\Delta\nu_p}\sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}}\exp\big[-\frac{4\ln 2(\nu-\nu_p)^2}{\Delta\nu_p^2}\big]$$

(11)

式中： $\Delta\nu_p$ （或者 $\Delta\lambda_p$ ）为泵浦光线宽。

铷原子的相关参数如表 1 所示。

表 1 铷原子参数

Table 1 Parameters of rubidium

ν_p /Hz	ν_l /Hz	τ_{31} /ns	τ_{21} /ns	ΔE /cm ⁻¹	$\gamma_M(394\text{ K})$ /(MHz·Pa ⁻¹)	$\gamma_{He}(394\text{ K})$ /(MHz·Pa ⁻¹)
3.842 3×10 ¹⁴	3.771 1×10 ¹⁴	26.23	27.7	237.5	0.197+0.005 ^[13]	0.150+0.001 ^[13]

2 阈值计算方法

稳态时，令式(1)~(3)等于零，阈值条件下，令式(1)~(3)中的 $I_1^+(z)$ ， $I_1^-(z)$ 等于零。由式(2)，(6)可以得到

$$n_2(z)=\frac{\gamma_{\text{mix}}n_3(z)}{2\gamma_{\text{mix}}\exp(-\frac{\Delta E}{k_B T})+\frac{1}{\tau_{31}}}$$

(12)

$$n_1(z)=n(z)-n_2(z)-n_3(z)$$

(13)

将式(12)~(13)代入式(3)得

$$\begin{aligned} & \bigg[n(z)-\frac{\gamma_{\text{mix}}n_3(z)}{2\gamma_{\text{mix}}\exp(-\frac{\Delta E}{k_B T})+\frac{1}{\tau_{31}}}-n_3(z)-\frac{1}{2}n_3(z)\bigg]\int_0^\infty\frac{\sigma_{13}(\nu)\times I_p(z,\nu)}{h\nu_p}\text{d}\nu- \\ & \gamma_{\text{mix}}\bigg[n_3(z)-2\exp(-\frac{\Delta E}{k_B T})n_2(z)-\frac{n_3(z)}{\tau_{31}}\bigg]=0 \end{aligned}$$

(14)

假定 $I_p(0)$ 已知，通过式(12)可以求出 $n_1(0)$ ， $n_2(0)$ ， $n_3(0)$ ，接着通过迭代

$$I_p(z+\Delta z,\nu)=I_p(z,\nu)\exp\{-[n_1(z)-\frac{1}{2}n_3(z)]\sigma_{13}(\nu)\Delta z\}$$

(15)

最终得到 $n_1(l)$ ， $n_2(l)$ ， $n_3(l)$ 。

小信号增益系数为

$$g^0(z)=[n_2(z)-n_1(z)]\sigma_{21}$$

(16)

单程小信号增益因子为

$$g^0=\int_0^l[n_2(z)-n_1(z)]\sigma_{21}\text{d}z$$

(17)

单程损耗为

$$\alpha=-\frac{\ln(T_1^4T_s^2R_lR_{oc})}{2}$$

(18)

调整 $I_p(0)$ ，直到令 $g^0=\alpha$ 时的 $I_p(0)$ 为阈值泵浦光功率密度 I_{th} 。当 $g^0=\alpha$ 时，称为阈值振荡情况。因此，工作物质的增益特性和光腔的损耗特性是影响激光器阈值功率密度的决定因素。

3 增益特性对阈值功率密度的影响

3.1 铷室温度对阈值的影响

计算采用的参数为：泵浦光线宽 $\Delta\lambda_p=0.1\text{ nm}$ ，氦气压强 $p_{He}=66.5\text{ kPa}$ ，甲烷压强 $p_M=39.9\text{ kPa}$ 。图 3 表示的是温度对阈值功率密度的影响。可以看出，温度过高或者过低都会使阈值增大。温度主要影响粒子数密度，如果温度过高，铷室内的铷原子数变大，需要的泵浦功率密度会变大；温度过低时，由于腔内的损耗一定，因此需要的泵浦功率密度也变大。存在一个使阈值功率密度最低的温度，称之为最佳温度。并且不同铷室长度下的最佳温度也不相同。另外，在 400 K 以上的温度区域内，相同温度下铷室长度越长，对应的阈值功率密度越大，在 380 K 以下的温度区域则相反。图中显示铷室长度 $l=20$

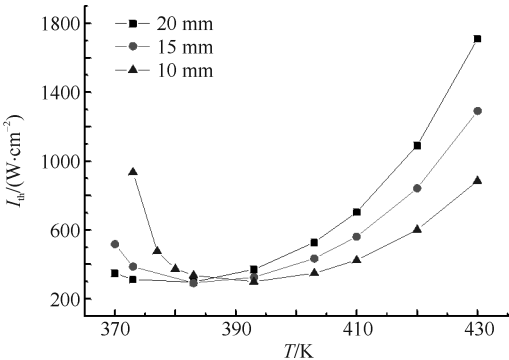


Fig. 3 Influence of temperature on threshold pump intensity

图 3 温度对阈值功率密度的影响

mm 时的最佳温度约为 379 K, 在本文实验条件下, 如控制激光器阈值相对于 379 K 时的增长不超过一倍, 温度不能超过 405 K。

图 4(a) 表示的是铷室长度 $l=20$ mm, 铷室温度为 379 K 时, 增益介质中不同位置处的泵浦光功率密度, 图 4(b) 表示室温下增益介质中不同位置处的小信号增益系数。可以看到, 小信号增益系数 $g^0(z)$ 随 z 的增加而减小, 主要是因为泵浦光功率密度在 z 方向上不断减小。

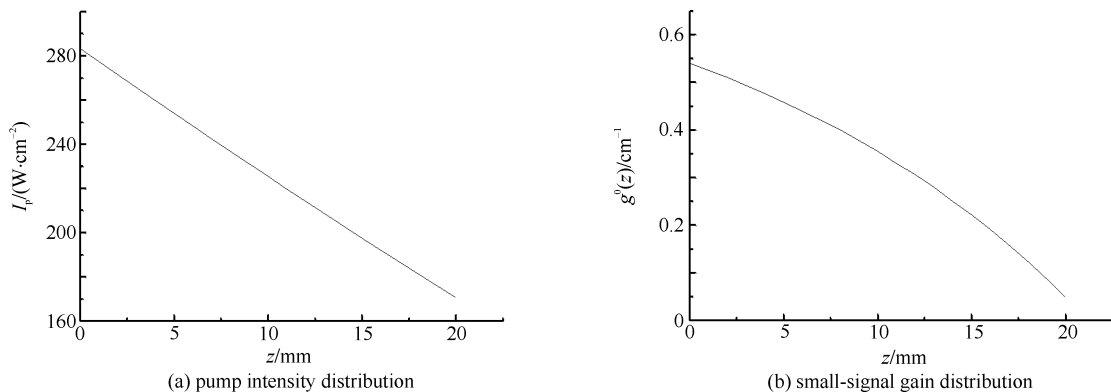


Fig. 4 Pump intensity and small-signal gain distributions along gain medium

图 4 泵浦光功率密度和小信号增益系数在增益介质长度方向上的变化

图 5 表示的是在相同参数条件下, 不同长度的铷室的最佳温度和对应的阈值功率密度。可以看到, 随着增铷室长度的增大, 最佳温度呈下降趋势, 但对应的阈值功率密度变化不大。因此可以认为, 当铷蒸气激光器的其他参数条件确定时, 在阈值功率密度方面, 温度和长度具有等价性, 即存在使阈值功率密度达到最小的最佳铷室长度和温度的组合。在实验探索出光阶段, 在成本和安全性的基础上应尽量考虑铷室长度和温度的组合, 从而有效降低激光器的阈值功率密度。

3.2 泵浦光线宽对阈值功率密度的影响

图 6 表示的是泵浦光线宽对阈值功率密度的影响。从图中可以看出, 泵浦光线宽越宽, 阈值功率密度越大, 并且泵浦光线宽对阈值功率密度的影响基本是线性的。阈值功率密度随线宽的变化率为 $1684 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm})$ 。在本文实验条件下, 如控制激光器阈值相对于泵浦光线宽为 0.1 nm 时的增长不超过一倍, 泵浦光线宽不能超过 0.25 nm。

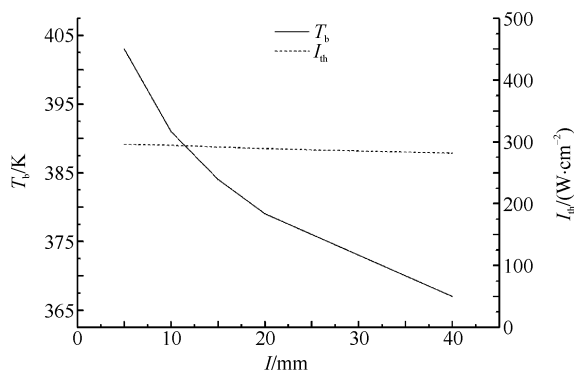


Fig. 5 Influence of Rb chamber length on optimal temperature and corresponding threshold pump intensity

图 5 不同长度下的最佳温度和对应的阈值功率密度

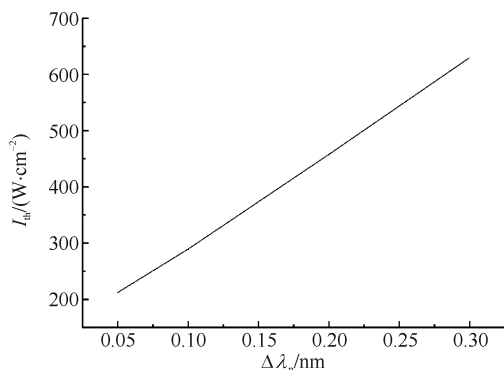


Fig. 6 Influence of pump linewidth on threshold pump intensity

图 6 泵浦光线宽对阈值功率密度的影响

3.3 泵浦光中心波长和铷蒸气吸收波长的偏移对阈值功率的影响

由于铷蒸气的吸收峰随缓冲气体和温度变化存在漂移现象^[13], 因此泵浦光中心波长和碱金属蒸气吸收波长的偏移对阈值功率密度是有影响的。图 7 表示在不同泵浦光线宽下, 泵浦光中心波长和铷蒸气吸收波长的偏移对阈值功率的影响。可以看到, 当偏移量小于 0.02 nm 时, 对阈值功率密度的影响不大, 这是因为铷原子在泵浦光线翼部分也有很大吸收。并且谱宽越宽, 偏移量对阈值功率密度的影响越小。当泵浦光线宽分别为 0.1, 0.2, 0.3 nm 时, 阈值功率密度增大 30% 时对应偏移量分别为 0.04, 0.07, 0.10 nm。

3.4 铷蒸气吸收线宽对阈值功率密度的影响

为有效实现 DPAL,一方面需要加入氦气等缓冲气体通过碰撞加宽的方式加宽原子的吸收光谱;另一方面需要加入烃类分子使 $5^2P_{3/2}$ 能级上的粒子快速弛豫到 $5^2P_{1/2}$ 能级以抑制自发辐射,同时烃类分子对加宽铷原子的吸收光谱也有作用^[14]。根据式(10)可以算出充入不同压强的缓冲气体时铷原子的吸收线宽,如表 2 所示。

表 2 铷原子在 $T=379\text{ K}$ 时充入不同缓冲气体压强下的吸收线宽
Table 2 Rb absorption linewidth broadened by buffer gas at 379 K

p/kPa	$\Delta\nu_{D_2}/\text{GHz}$	$\Delta\lambda_{D_2}/\text{nm}$
$p_M=13.3, p_{He}=13.3$	6.4	0.013
$p_M=39.9, p_{He}=66.5$	24.8	0.050
$p_M=39.9, p_{He}=186.2$	49.9	0.101
$p_M=133, p_{He}=186.2$	75.4	0.153

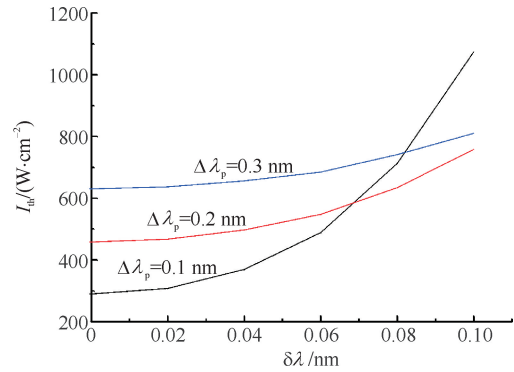


Fig. 7 Influence of the difference between central pump wavelength and central absorption wavelength on threshold pump intensity

图 7 泵浦光中心波长和铷蒸气吸收波长的偏移对阈值功率的影响

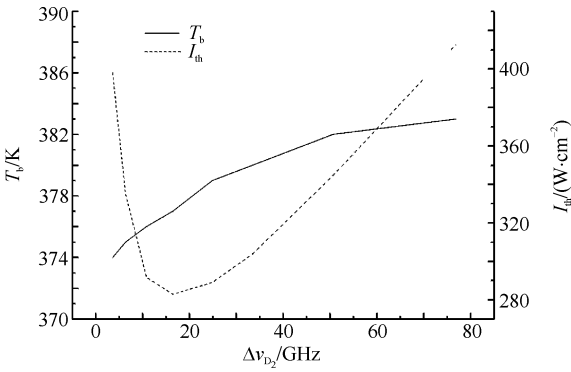


Fig. 8 Influence of Rb absorption linewidth on optimal temperature and corresponding threshold pump intensity

图 8 不同铷蒸气吸收线宽下的最佳温度和对应的阈值功率密度

图 8 表示当泵浦光线宽为 0.1 nm,铷室长度为 20 mm 时,不同铷蒸气吸收线宽下的最佳温度和对应的阈值功率密度。可以看到,随着铷蒸气吸收线宽的增加,最佳温度不断上升,但相应的阈值功率密度先下降,到最低点后逐渐上升。利用缓冲气体加宽铷蒸气的吸收线宽可以减小激光器的阈值功率密度,但是过大的吸收线宽会导致原子吸收截面的减小,反而会增加阈值功率密度。从图 8 中可以看到,在本文中讨论的实验条件下,使阈值功率密度达到最低的铷蒸气吸收线宽为 16.5 GHz(0.034 nm),即充入氦气压强 $p_{He}=26.6\text{ kPa}$,甲烷压强 $p_M=39.9\text{ kPa}$ 。

4 损耗特性对阈值功率密度的影响

4.1 铷室窗口片的透过率对阈值功率密度的影响

在铷室长度为 20 mm,温度为最佳温度($T_b=379\text{ K}$)时,计算了铷室窗口片的透过率对阈值功率密度的影响,如图 9 所示。可以看到,随着透过率的增大,阈值功率密度不断减小。

由于泵浦光波长和铷蒸气激光波长较接近,可以认为窗口片对这两种波长的光的透过率是一样的。如果窗口片的材料为玻璃,在不镀膜的情况下单个窗口片的透过率为 92%,窗口片单面镀膜后透过率可以达到 96%。从图 9 可以看出单面镀膜后阈值功率密度下降 8.6%。但是有文献表明,由于蓝宝石的化学性质稳定,并且损伤阈值较高,因此用蓝宝石做为窗口片比较合适^[15-16]。在没有镀膜情况下,单个蓝宝石窗口片的透过率为 85.1%,窗口片单面镀膜后可以达到 92.3%,单面镀膜后阈值功率密度下降 16.2%。可以看到,对于蓝宝石窗口片应尽量考虑镀膜。

4.2 输出耦合率对阈值功率密度的影响

在上述参数条件下,计算了输出耦合率对阈值功率密度的影响,如图 10 所示。图 10 表明,当输出耦合率不超过 0.4 时,阈值功率密度上升平缓,变化很小;当输出耦合率从 0.8 增大到 1.0 时,阈值功率密度迅速上升。

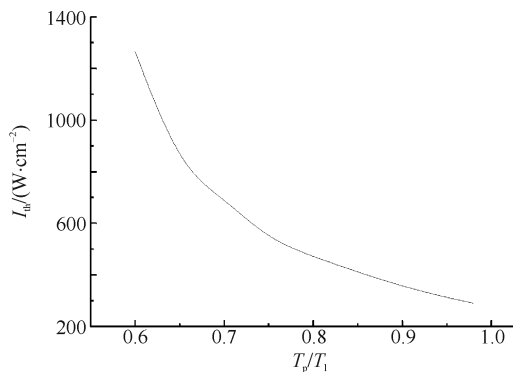


Fig. 9 Influence of cell window transmission on threshold pump intensity

图 9 窗口片透过率对阈值功率密度的影响

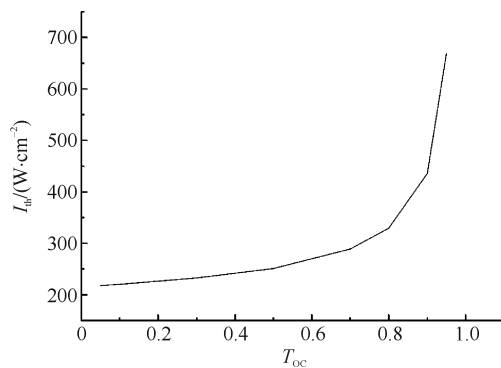


Fig. 10 Influence of output coupling efficiency on threshold pump intensity

图 10 输出耦合率对阈值功率密度的影响

5 结 论

本文以速率方程为基础建立理论模型,研究了半导体泵浦铷蒸气激光器的阈值特性。结果表明:激光器存在最佳铷室温度,能够使阈值功率密度达到最小;铷室长度对阈值功率密度有影响,不同铷室长度下的最佳温度不同,并且当铷蒸气激光器的其他参数条件确定时,在阈值功率密度方面,温度和长度具有等价性,即存在使阈值功率密度达到最小的最佳铷室长度和温度的组合,因此在实验探索出光阶段,在成本和安全性的基础上应尽量考虑铷室长度和温度的组合,从而有效降低激光器的阈值功率密度;泵浦光线宽对激光阈值功率密度的影响接近是线性;泵浦光中心波长和铷蒸气吸收波长的偏移对阈值功率有影响,但当偏移量小于 0.02 nm 时,对阈值功率密度的影响不大;泵浦光线宽和铷原子吸收线宽之间存在匹配,在本文讨论的参数下,最佳吸收线宽约为 16.5 GHz(0.034 nm),过高的铷原子吸收线宽反而会增大激光器的阈值功率密度;通过采用镀膜等技术手段增大铷室窗口片的透过率,可以减小阈值功率密度;阈值功率密度随谐振腔的输出耦合率的增大而增加,输出耦合率在不超过 0.4 时对阈值功率密度的影响较小,一般不宜大于 80%。在本文理论模拟指导下,中国科学院电子学研究所采用线宽 0.26 nm 的泵浦源在国内首次实现了半导体泵浦铷蒸气激光输出,阈值泵浦光功率 1.57 W,初步验证了该模型的有效性和实用性。

参考文献:

- [1] Krupke W F, Beach R J, Kanz V K, et al. Resonance transition 795 nm rubidium laser[J]. *Opt Lett*, 2003, **28**(23): 2336-2338.
- [2] Zhdanov B V, Sell J, Knize R J. Multiple laser diode array pumped Cs laser with 48 W output power[J]. *Electronics Lett*, 2008, **44**(9): 582-583.
- [3] Zhdanov B V, Stooke A, Boyadjian G, et al. Rubidium vapor laser pumped by two laser diode arrays[J]. *Opt Lett*, 2008, **33**(5): 414-415.
- [4] Zweiback J, Komashko A, Krupke W F. Alkali vapor lasers[C]//Proc of SPIE. 2010: **68740G**.
- [5] 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**(9): 2273-2274. (Yang Zining, Wang Hongyan, Hua Weihong, et al. Diode pumped rubidium vapor laser. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(9): 2273-2274)
- [6] 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**: **0102009**. (Xu Cheng, Tan Rongqing, Li Zhiyong, et al. 2.8 W linearly polarized output of Rubidium vapor laser with diode pumping. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**: **0102009**)
- [7] Beach R J, Krupke W F, Kanz V K, 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.
- [8] Hager G D, Perram G P. A three-level analytic model for alkali metal vapor lasers: part I. Narrowband optical pumping[J]. *Appl Phys B*, 2010, **101**: 45-56.
- [9] 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**.
- [10] 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]. *J Opt Soc Am B*, 2011, **28**(6): 1353-1364.
- [11] 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.

[12] Alcock C B, Itkin V P, Horrigan M K. Vapor-pressure equations for the metallic elements[J]. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 1984, **23**(3): 309-313.

[13] Zamoski N D, Hager G D, Rudolph W, et al. Pressure broadening and collisional shift of the Rb D₂ absorption line by CH₄, C₂H₆, C₃H₈, n-C₄H₁₀, and He[J]. *J Quant Spectrosc Radiat Transf*, 2011, **112**(1):59-67.

[14] 李志永,谭荣清,徐程,等. 用于铷蒸气激光泵浦的窄线宽阵列半导体激光器[J]. 强激光与粒子束, 2013, **25**(4):875-878. (Li Zhiyong, Tan Rongqing, Xu Cheng, et al. Laser diode array with narrow linewidth for Rubidium vapor laser pump. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(4):875-878)

[15] Petersen A, Randall L. Second harmonic operation of diode-pumped Rb vapor lasers[C]//Proc of SPIE. 2008, **7005**: 529.

[16] 李志永,谭荣清,徐程,等. 一种 Rb 蒸气对窄线宽 780 nm 激光吸收率和吸收峰的测量方法[J]. 光电子·激光,2013,**23**(11):2168-2173. (Li Zhiyong, Tan Rongqing, Xu Cheng, et al. Method for measuring Rb vapor's absorptivity and absorptive peak for 780 nm laser with narrow linewidth. *Journal of Optoelectronics · Laser*,2013,**23**(11):2168-2173)

Analysis on threshold characteristics of diode pumped rubidium vapor lasers

Li Lin^{1,2}, Tan Rongqing¹, Xu Cheng^{1,2}, Li Zhiyong^{1,2}

(1. Department of High Power Gas Laser, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The threshold characteristics of lasers are of great importance to the output of lasers. In this paper, we use a theoretical model, which is based on rate equations, to investigate the threshold characteristics of an end-pumped single-pass rubidium vapor laser using iteration method. The results show that, the influences of temperature and gain medium length on the threshold pump intensity are equivalent, and there exists an optimum combination of temperature and gain medium length which can minimize threshold pump intensity. The influence of pump linewidth on threshold pump intensity is linear, and the influence of central wavelength shift on pump intensity will be smaller if the pump linewidth is broader. Also there exists an optimum Rb atomic absorption linewidth, which can minimize threshold pump intensity. In order to reduce threshold pump intensity, the cell window should be anti-reflectively coated, and the output coupling-efficiency should be less than 80%.

Key words: diode pump; Rb vapor laser; threshold pump intensity

PACS: 42.55.Lt; 42.55.Xi