

短蒸气室自加热碱金属激光器输出特性

韩高策^{1,2}, 李志永^{1,3}, 谭荣清^{1,2}, 黄 伟^{1,2}, 李 辉^{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 100049;

³解放军电子工程学院脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 短蒸气室自加热碱金属激光器的原理是利用未被增益介质吸收的抽运光加热碱金属蒸气室。基于三能级速率方程, 建立了半导体激光双端抽运碱金属激光器的理论模型, 研究了增益介质长度、蒸气室温度和抽运源线宽等参数对短蒸气室自加热碱金属激光器输出激光的影响。研究表明, 在普通外腔半导体激光器抽运下, 增益介质长度为 2 mm 时可以实现瓦级激光输出, 选择较高的抽运光功率可提高自加热碱金属激光器的输出功率。该研究结果将为自加热碱金属激光器的实验提供理论基础, 并可进一步拓展小功率碱金属激光器的应用领域。

关键词 激光器; 气体激光器; 碱金属激光器; 短蒸气室

中图分类号 TN248.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0601002

Output Properties of Self-Heated Alkali Laser with Mini Vapor Cell

Han Gaoce^{1,2}, Li Zhiyong^{1,3}, Tan Rongqing^{1,2}, Huang Wei^{1,2}, Li Hui^{1,2}

¹Department of High Power Gas Laser Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract The pump light unabsorbed by gain medium is used to heat alkali vapor cell in a self-heated alkali laser with a mini vapor cell. A theoretical model of alkali laser under semiconductor laser double-end pumping is constructed, and the influences of the length of gain medium, the temperature of vapor cell and the linewidth of pumped source on the output laser of the self-heated alkali laser with a mini vapor cell are analyzed. The results show that, pumped by a common external cavity semiconductor laser, the W-class output laser can be achieved when the length of gain medium is 2 mm. The output power of the self-heated alkali laser can be improved with a high pump power. The research results offer the theoretical foundation for the self-heated alkali laser experiment, and expand the application of alkali laser with low power.

Key words lasers; gas laser; alkali laser; mini vapor cell

OCIS codes 140.1340; 140.3460; 140.3480

1 引 言

半导体激光抽运碱金属激光器(DPAL)是一种新型的光抽运气体激光器^[1]。2016年, Pitz等^[2]利用碱金属蒸气流动装置实现了功率为 1.5 kW 的钾蒸气激光输出, 该功率为目前该类激光器可实现的最高连续输出功率。无需对碱金属激光器输出的激光波长进行稳频, 即可与碱金属原子 D₁ 线精确对准, 且这类激光器

收稿日期: 2017-01-19; 收到修改稿日期: 2017-02-19

基金项目: 国家自然科学基金(61505212)、脉冲功率激光技术重点实验室基金(SKL2016KF02)

作者简介: 韩高策(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事新型微结构激光器件方面的研究。

E-mail: hangaoce14@mails.ucas.ac.cn

导师简介: 谭荣清(1966—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事气体激光技术及其应用等方面研究。

E-mail: rongqingtan@163.com(通信联系人)

产生的激光具有光束质量好、线宽窄、波长稳定和输出功率可成比例放大的特点。以上特点使得 DPAL 在用作无自旋交换弛豫 (SERF) 机制碱金属(钾、铷和铯)原子磁力计^[3]抽运源时,能够克服用作 SERF 磁力计抽运源的窄线宽半导体激光器^[4]单管功率低和需要稳频的缺点,具这类激光器产生的激光有较好的应用前景。

为了达到激光器运转所需的增益介质粒子数密度,碱金属激光器蒸气室的温度通常控制在 100~200 °C。2015 年,Zhdanov 等^[5]实现了增益介质循环流动的钾蒸气激光器,蒸气室温度为 185 °C;2016 年,谭彦楠等^[6]采用布儒斯特角结构的蒸气室实现了峰值功率 16.8 W 的铷激光输出,蒸气室温度为 160 °C;2015 年,陈飞等^[7]利用光纤耦合半导体激光器端面抽运蒸气室长度为 5 mm 的铯蒸气激光器,蒸气室温度为 107.6 °C。目前,在小功率碱金属激光器中,通常使用玻璃吹制的碱金属蒸气室^[8],为了达到激光器的工作温度,通常需要将碱金属蒸气室加热。2014 年,Li 等^[9]搭建的输出功率为 1.4 W 的铯蒸气激光器,抽运光功率约为 7.8 W,被吸收的抽运光功率约为 3 W,激光器中采用了直径为 20 mm、长度为 12 mm 的圆柱形石英玻璃蒸气室,加热蒸气室所用的功率约为 20 W。加热蒸气室消耗的功率是小功率碱金属激光器中不可忽略的功耗,通常可与抽运光的功率相比拟。此外,加热碱金属蒸气室需要多个温度控制器及电源等器件,增加了碱金属激光器的复杂性,限制了碱金属激光器在小功率激光器件领域的应用。因此,自加热碱金属激光器的实现将能提高碱金属激光器在小功率激光器领域的竞争力。

自加热碱金属激光器采用双端抽运结构,利用未被蒸气室吸收的抽运光加热碱金属蒸气室窗口。一方面,该种激光器蒸气室的加热源处于窗口片处,与目前碱金属激光器常用的温度管理措施相同,可以保证蒸气室窗口温度高于主体部分温度,防止碱金属颗粒在窗口上凝结;另一方面,使用未被蒸气室吸收的抽运光加热碱金属蒸气室时,通过选择具有合适线宽和功率的抽运源,可以减小碱金属激光器的复杂性,从而有望提高碱金属激光器的插头效率。受限于抽运光的加热功率,蒸气室较短,增益介质长度也较短,从而有利于碱金属激光器的自加热激光输出。本文对短蒸气室的碱金属激光器进行了研究,讨论了双端抽运碱金属激光器的激光输出特性,并对短蒸气室碱金属激光器实现自加热激光输出的可行性进行了分析。

2 理论模型

双端单程 DPAL 的示意图如图 1 所示。图 1(a)为抽运光在谐振腔内不同位置的抽运功率,图 1(b)为碱金属激光器的输出激光功率及谐振腔内不同位置的功率。图中,PBS 为偏振分束器;HR 为高反射镜,反射率为 99.5%,理论计算中 HR 的反射率近似为 100%;OC 为输出耦合镜,透射率为 70%。图中各参量的物理意义如表 1 所示。

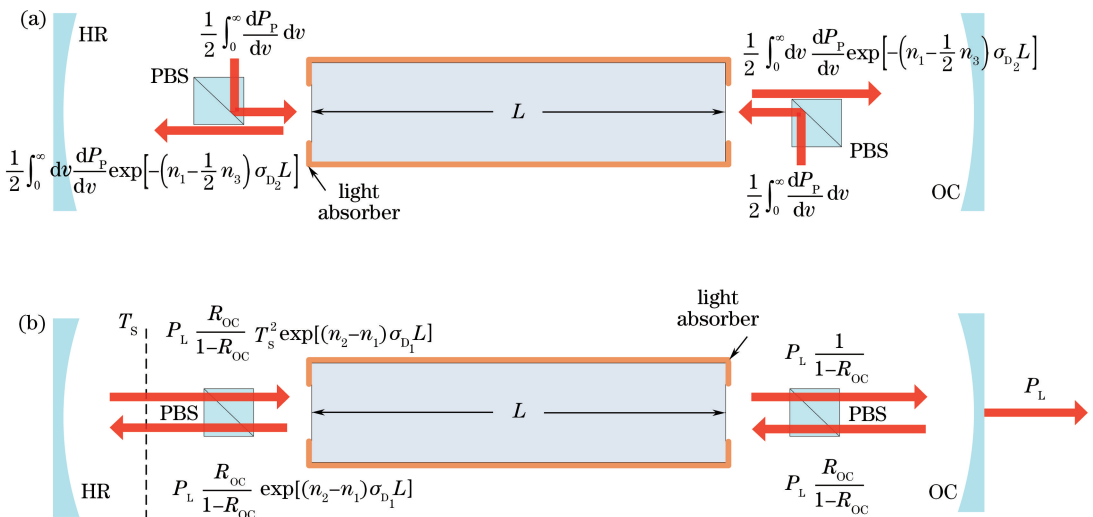


图 1 双端单程 DPAL 示意图。(a)不同位置的抽运光功率;(b)不同位置的铯激光功率

Fig. 1 Diagram of double-end single-pass DPAL. (a) Pump light powers at different points; (b) Cs laser powers at different points

如图 1 所示,自加热激光器采用双凹谐振腔,具有对称结构。为了利用抽运光加热蒸气室,采用双端单程抽运的方案。抽运光通过 PBS 耦合进入碱金属蒸气室,聚焦后的抽运光束腰处于本侧吸光片通光孔的中心位置。由于抽运光聚焦后会快速发散,单程通过增益介质后未被蒸气室吸收的抽运光会被另一侧的吸光片吸收,从而达到加热微结构蒸气室的目的。为了实现抽运光与碱金属激光的耦合,在谐振腔内加入 PBS,该激光器的输出光为线偏振激光,通过 1/4 波片可将输出激光的偏振态调整为左旋圆偏振光,从而用作 SERF 磁力计的抽运光。

由于铯蒸气激光器的蒸气室温度较低,较易实现自加热激光输出,因此,对铯蒸气激光器进行分析和讨论。铯蒸气激光器是典型的三能级激光系统,稳态时各能级粒子数密度不随时间变化,其速率方程为

$$\frac{dn_1}{dt} = -\Gamma_P + \Gamma_L + n_2(A_{21} + Q_{21}) + n_3(A_{31} + Q_{31}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{dn_2}{dt} = -\Gamma_L + \gamma_{\text{mix}} \left[n_3 - 2 \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right) n_2 \right] - n_2(A_{21} + Q_{21}) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{dn_3}{dt} = \Gamma_P - \gamma_{\text{mix}} \left[n_3 - 2 \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right) n_2 \right] - n_3(A_{31} + Q_{31}) = 0, \quad (3)$$

式中 n_1 、 n_2 、 n_3 分别为 $^2S_{1/2}$ 、 $^2P_{1/2}$ 和 $^2P_{3/2}$ 能级的粒子数密度, A_{21} 、 A_{31} 分别为 $^2P_{1/2}$ 和 $^2P_{3/2}$ 能级的自发辐射跃迁速率, Q_{21} 、 Q_{31} 分别为 $^2P_{1/2}$ 和 $^2P_{3/2}$ 能级的无辐射跃迁几率, Γ_P 为双端总抽运速率, Γ_L 为激光速率, γ_{mix} 为 $^2P_{1/2}$ 和 $^2P_{3/2}$ 能级精细结构的碰撞速率, ΔE 为 $^2P_{1/2}$ 和 $^2P_{3/2}$ 的能级间隔, k_B 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度。粒子数守恒方程为

$$n = n_1 + n_2 + n_3, \quad (4)$$

式中 n 为碱金属原子总粒子数密度^[10]。由于原子的无辐射跃迁几率远小于自发辐射跃迁几率,故在理论模型中忽略无辐射跃迁几率^[11]。甲烷具有展宽抽运吸收线宽和加快两个上能级之间精细结构碰撞速率的作用,已在多个高效率、高稳定性的碱金属激光系统中得到应用^[9,12-13],因此自加热碱金属激光器中仅使用甲烷作为缓冲气体。此外,结合自加热 DPAL 短蒸气室增益长度较短的特点,在不影响理论模型可靠性的前提下,可进行如下假设:1) 两端抽运光完全对称;2) 入射的抽运光为平顶光束,功率密度均匀;3) 抽运光和激光在增益区传输时,其光束半径近似不变;4) 忽略蒸气室窗口片引起的抽运光和激光的损失。

上述假设在自加热碱金属激光器的工作条件下是较为合理的,其原因是:1) 在该激光器中,抽运光同时承担了加热碱金属蒸气室的作用,为了避免碱金属颗粒在窗口处沉积,双端抽运光具有完全相同的参数和聚焦特性是十分必要的;2) 半导体激光在快慢轴光束质量因子均匀化后,光束质量因子通常为 40 左右^[14],在聚焦后可以认为抽运光为平顶光束;3) 为了便于实现碱金属激光器的自加热,该激光器的增益介质长度(最长为 4 mm)较短,且抽运光的束腰在本侧蒸气室的窗口处,因此抽运光在增益区内的光束半径可认为近似不变;4) 采用布儒斯特窗^[6]和镀增透膜^[8]等技术手段时,窗口片对抽运光和碱金属激光基本没有损耗,因此可以忽略蒸气室窗口片引起的抽运光和激光的损失。

根据上述假设和图 1 所示的物理过程,双端总抽运速率 Γ_P 和激光速率 Γ_L 可分别表示为

$$\Gamma_P = \frac{\eta_{\text{mode}}}{V_L} \int_0^\infty \frac{1}{h\nu} \frac{dP_P}{d\nu} \left\{ 1 - \exp\left[-\left(n_1 - \frac{1}{2}n_3\right)\sigma_{D_2}(\nu)L\right] \right\} d\nu, \quad (5)$$

$$\Gamma_L = \frac{1}{V_L} \frac{P_L}{h\nu_L} \frac{R_{\text{oc}}}{1 - R_{\text{oc}}} \left(\frac{1}{\sqrt{T_s^2 R_{\text{oc}}}} - 1 \right) \left(1 + \sqrt{\frac{T_s^2}{R_{\text{oc}}}} \right), \quad (6)$$

式中 η_{mode} 为模式匹配因子, V_L 为激光模体积, h 为普朗克常数, ν 为抽运光频率, P_P 和 P_L 分别为抽运光功率和激光功率, $\sigma_{D_2}(\nu)$ 为碱金属原子 D_2 线吸收谱对应某一频率的吸收截面, L 为增益介质长度, T_s 为单程损耗, R_{oc} 为输出耦合镜的反射率。 T_s 和 R_{oc} 的关系满足

$$R_{\text{oc}} T_s^2 \exp[2(n_2 - n_1)\sigma_{D_1}L] = 1, \quad (7)$$

式中 σ_{D_1} 为碱金属原子 D_1 线吸收截面。抽运光光谱为高斯线型,碱金属原子 D_2 线吸收截面 σ_{D_2} 为频率 ν 的函数^[1]。

联立(1)~(7)式,可得到激光功率 P_L 与抽运光功率 P_P 的关系为

$$\begin{aligned} & \frac{P_L}{V_L} \frac{1}{h\nu_L} \frac{2R_{OC}}{1-R_{OC}} \left(\frac{1}{\sqrt{T_S^2 R_{OC}}} - 1 \right) \left(1 + \sqrt{\frac{T_S^2}{R_{OC}}} \right) = \\ & \frac{\eta_{\text{mode}}}{V_L} \int_0^\infty \frac{1}{h\nu} \frac{dP_P}{d\nu} \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{1}{2} \left(n - 2n_3 - \frac{1}{2\sigma_{D_1} L} \ln \frac{1}{T_S^2 R_{OC}} \right) \sigma_{D_2}(\nu) L \right] \right\} d\nu + \\ & \gamma_{\text{mix}} \left[n_3 - \left(n - n_3 + \frac{1}{2\sigma_{D_1} L} \ln \frac{1}{T_S^2 R_{OC}} \right) \exp \left(-\frac{\Delta E}{k_B T} \right) \right] - \frac{1}{\tau_{D_1}} \left(n - n_3 + \frac{1}{2\sigma_{D_1} L} \ln \frac{1}{T_S^2 R_{OC}} \right) - \frac{n_3}{\tau_{D_2}}, \quad (8) \end{aligned}$$

式中 τ_{D_1} 和 τ_{D_2} 分别为 $^2P_{1/2}$ 和 $^2P_{3/2}$ 能级的能级寿命。对应的荧光功率 $P_{\text{fluorescence}}$ 、散射功率 $P_{\text{scattered}}$ 和热功率 P_{thermal} [1] 分别为

$$P_{\text{fluorescence}} = V_L \left(\frac{n_2}{\tau_{D_1}} \frac{hc}{\lambda_{D_1}} + \frac{n_3}{\tau_{D_2}} \frac{hc}{\lambda_{D_2}} \right), \quad (9)$$

$$P_{\text{scattered}} = (1 - T_S^2) P_L \frac{R_{OC}}{1 - R_{OC}} \frac{1}{\sqrt{T_S^2 R_{OC}}}, \quad (10)$$

$$P_{\text{thermal}} = V_L \gamma_{\text{mix}} \left\{ (n_3 - n_2) - \left[2 \exp \left(\frac{\Delta E}{k_B T} \right) - 1 \right] n_2 \right\} \Delta E, \quad (11)$$

式中 c 为真空光速。蒸气室吸收的抽运光功率 $P_{\text{P-abs}}$ 为

$$P_{\text{P-abs}} = P_L + P_{\text{fluorescence}} + P_{\text{scattered}} + P_{\text{thermal}}. \quad (12)$$

表 1 模型参数

Table 1 Model parameters

Parameter	Definition	Value	Reference
P_P, Γ_P	Power and absorption rate of double-end pump light	Equation (5)	
P_L, Γ_L	Power and emission rate of laser	Equation (8)	
n_1, n_2, n_3	Population densities of $^2S_{1/2}$, $^2P_{1/2}$ and $^2P_{3/2}$ energy levels	Rate equations	
n	Number density of alkali atoms	$n = \frac{133.322 \times 10^{7.046 - \frac{3830}{T}}}{k_B T}$	[10]
A_{21}, A_{31}	Spontaneous emission rates of $^2P_{1/2}$ and $^2P_{3/2}$ energy levels	$A = \tau^{-1}$	
Q_{21}, Q_{31}	Quenching rates of $^2P_{1/2}$ and $^2P_{3/2}$ energy levels		
τ_{D_1}, τ_{D_2}	Lifetimes of $^2P_{1/2}$ and $^2P_{3/2}$ energy levels	$\tau_{D_1} = 34.791 \text{ ns}, \tau_{D_2} = 30.405 \text{ ns}$	[1]
ν_P, ν_L	Laser and pump frequencies at line center	$\nu = c/\lambda$	
σ_{D_1}	Stimulated emission cross section for D_1 transition at line center	$\sigma_{D_1} = 1.53 \times 10^{-9} \text{ cm}^2$	[1]
$\lambda_{D_1}, \lambda_{D_2}$	Laser and pump wavelengths at line center	$\lambda_{D_1} = 894.59 \text{ nm}, \lambda_{D_2} = 852.35 \text{ nm}$	[1]
$\Delta\nu_P$	Full width at half maximum of pump light	10-100 GHz	
γ_{mix}	Fine-structure mixing rate between $^2P_{1/2}$ and $^2P_{3/2}$ energy levels	$1.07 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$	[1]
ΔE	Energy gap between $^2P_{1/2}$ and $^2P_{3/2}$ energy levels	$1.1054 \times 10^{-20} \text{ J}$	[1]
L	Length of gain medium	2-4 mm	
T	Absolute temperature	373-393 K	
V_L	Volume of laser mode		
η_{mode}	Mode overlap parameter	0.9	
P_{methane}	Pressure of the buffer gas methane	80 kPa	[13]
T_S	Other intra-cavity single-pass losses assumed to be located at back reflector	0.95	
h	Planck constant	$6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$	
k_B	Boltzmann constant	$1.3806504 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$	
c	Speed of light	$3.0 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	

3 激光输出特性

以上述构建的理论模型为基础,采用解超越方程的方法对双端单程抽运微结构铯蒸气激光器的输出特性进行理论研究。分别计算了增益介质长度 L 、蒸气室温度 T 及抽运源线宽 $\Delta\nu_p$ 对输出激光功率 P_L 和光光效率 η 的影响,同时还计算了蒸气室吸收的抽运光功率 P_{P-abs} 和激光功率 P_L 随抽运光功率 P_p 的变化。

3.1 增益长度的影响

较短的增益长度有利于实现碱金属激光器的自加热激光输出,研究了增益长度 L 为 2,3,4 mm 时激光器的输出特性。使用熔融玻璃制作增益介质长度在这一区间的碱金属蒸气室时,较难保证窗口端面的平整度,因此抽运光和激光的传输较易受到影响。2006年,Page等^[15]使用 ConFlat 法兰结构制作了增益长度为 2.25 mm 的蒸气室,但是,该类型的蒸气室体积大,使用抽运光加热时消耗功率高,不利于自加热碱金属激光器的实现。近年来,基于玻璃和硅片的阳极键合技术得到了快速发展,这种工艺制作的碱金属蒸气室具有结构紧凑的特点,通过控制硅片厚度即可缩短蒸气室,同时蒸气室窗口片的平整度较好,利用该方法能够实现增益长度为 2~4 mm 的蒸气室^[16]。结合稳定运转碱金属激光器的蒸气室温度和抽运源线宽^[8],在分析增益长度的影响时,选择蒸气室温度 T 为 383 K,抽运源线宽 $\Delta\nu_p$ 为 10 GHz。激光器输出功率 P_L 及光光效率 η 随增益长度 L 的变化如图 2 所示。

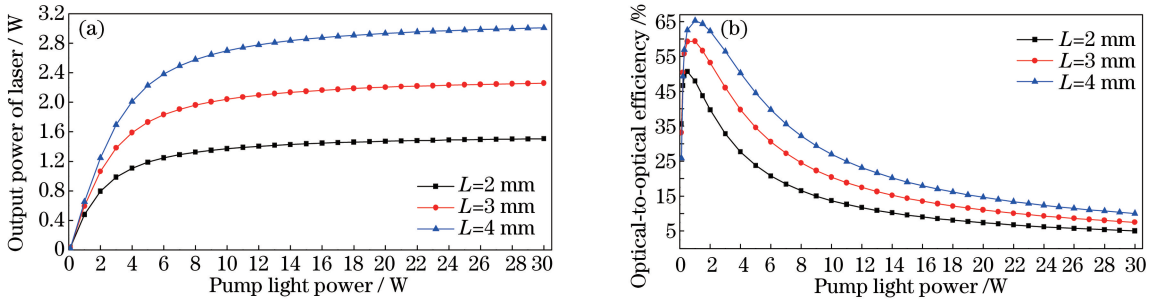


图 2 (a)激光器输出功率和(b)光光效率随增益介质长度的变化

Fig. 2 Variations in (a) output power of laser and (b) optical-to-optical efficiency with length of gain medium

由图 2 可见,随着增益介质长度变短,碱金属激光器输出的最高光光效率和最高功率均降低。当增益介质长度由 4 mm 减小至 2 mm 时,最高输出功率也相应地降低 50%,最高光光效率由 65% 下降至 51%。因此,增益介质长度变短后,激光器输出功率随之下降。事实上,瓦级功率输出的碱金属 D_1 线窄线宽激光可以满足 SERF 磁力计抽运的要求。由图 2 的计算结果可知,自加热碱金属激光器的增益介质长度可选为 2 mm。增益介质长度为 2 mm、抽运光功率为 10 W 时,对应输出激光功率为 1.37 W,之后输出激光功率随抽运光功率的增加而增加的速度变得缓慢,最终达到饱和值 1.51 W。

3.2 蒸气室温度的影响

由于采用自加热的碱金属蒸气室温度控制技术,蒸气室温度不仅与抽运光功率相关,也与自加热激光器中吸光片结构和光热转换特性等参数相关。通过优化抽运光功率和蒸气室壳体的对流换热系数等参数,可以对碱金属激光器蒸气室温度进行小范围调节。研究表明,铯蒸气激光器的蒸气室温度超过 120 °C (130~200 °C) 时,窗口片处产生了碳粒沉积,从而影响抽运光和激光的传输^[8]。因此,分别研究了蒸气室温度 T 为 373,383,393 K 的情况下,自加热碱金属激光器抽运光功率和输出激光功率的温度变化特性。增益介质长度 L 为 2 mm、抽运源线宽 $\Delta\nu_p$ 为 10 GHz 时,蒸气室温度对激光器输出功率和光光效率的影响如图 3 所示。

由图 3 可以看出,增益介质长度为 2 mm 时,温度越高,最高输出功率越高,最高光光效率及饱和时的效率越高。温度升高 10 °C 时,最高输出功率升高 1.07 W,最高光光效率由 51% 升至 63%;温度降低 10 °C 时,最高输出功率降低 0.66 W,最高光光效率降至 36%。出现该现象的原因主要是温度的升高增加了碱金属原子数密度,从而提高了碱金属激光器输出较高功率的能力。对于自加热碱金属激光器,当抽运结构和抽运光加热装置确定后,在蒸气室饱和和吸收的区间内,通过提高或降低抽运光功率,可以优化蒸气室工作温度,进而获得指定的碱金属激光功率。

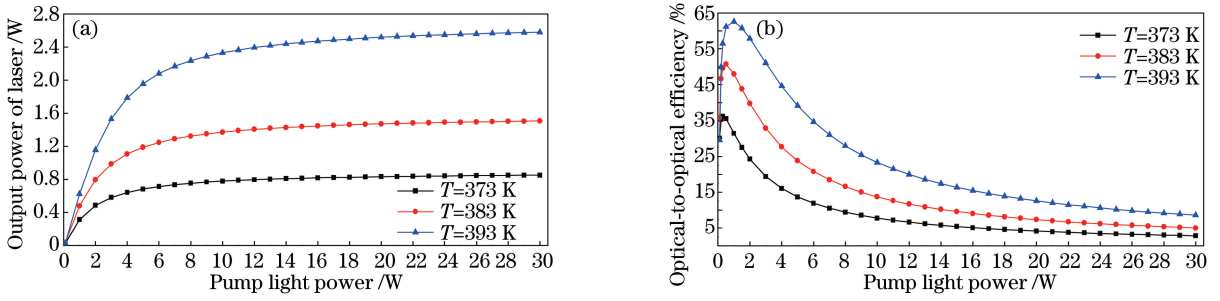


图 3 蒸气室温度对(a)激光器输出功率和(b)光光效率的影响

Fig. 3 Influence of temperature of vapor cell on (a) output power of laser and (b) optical-to-optical efficiency

3.3 抽运源线宽的影响

碱金属激光器的抽运源通常为窄线宽的外腔半导体激光器^[8]。线宽为 10 GHz 的高功率窄线宽半导体激光器一般需在芯片前端面镀增透膜,从而抑制内腔的纵模,而普通的半导体激光器构建的外腔抽运源,其线宽通常为 50~100 GHz^[17]。分别计算了增益长度 L 为 2 mm、蒸气室温度 T 为 383 K 时,抽运源线宽 $\Delta\nu_p$ 为 10, 50, 100 GHz 的情况下抽运源线宽对激光器输出功率和光光效率的影响,如图 4 所示。

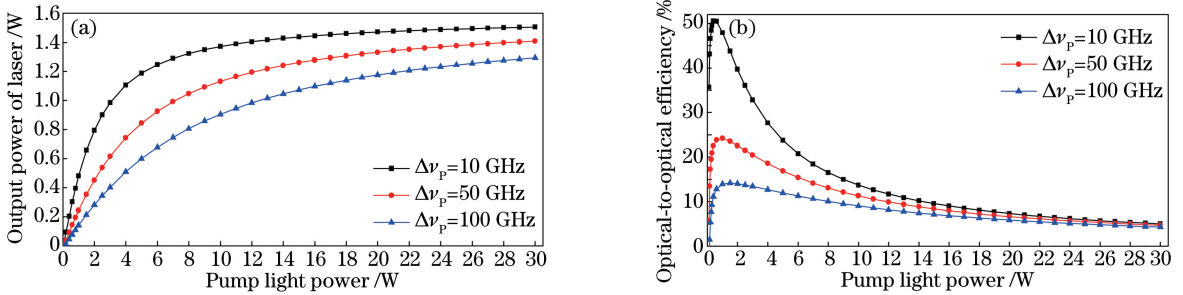


图 4 抽运源线宽对(a)激光器输出功率和(b)光光效率的影响

Fig. 4 Influence of line width of pump source on (a) output power of laser and (b) optical-to-optical efficiency

当缓冲气体为单一甲烷气体且缓冲气体气压为 80 kPa 时,对应的铯原子 D_2 线线宽约为 14 GHz。当抽运源线宽为 10 GHz 时,线宽匹配特性较好。由图 4 可见,随着线宽的增加,线宽匹配特性变差,最高光光效率降低。值得注意的是,尽管抽运源线宽的改变使得激光器趋于饱和的速度变慢,在抽运强度分别大于 $6.60 \times 10^7, 8.67 \times 10^7, 1.15 \times 10^8$ W/m² (即抽运光功率分别大于 16.58, 21.79, 28.9 W) 时,三种线宽的抽运光表现出相似的输出特性。当抽运强度为 1.19×10^8 W/m² (对应抽运光功率为 30 W) 时,输出功率分别为 1.51, 1.41, 1.29 W, 光光效率分别为 5.02%, 4.69%, 4.31%。这一特点使得自加热碱金属激光器可以选择线宽较宽的抽运源,并且可以使用基于普通半导体激光器构建的外腔抽运源。

3.4 蒸气室吸收的抽运光

自加热碱金属激光器是利用未被蒸气室吸收的抽运光加热碱金属蒸气室,因此计算了增益长度 L 为 2 mm、蒸气室温度 T 为 383 K、抽运源线宽 $\Delta\nu_p$ 为 50 GHz 时蒸气室对抽运光的吸收特性。激光器输出功率 P_L 和蒸气室吸收的抽运光功率 P_{p-abs} 随抽运光功率 P_p 的变化如图 5 所示。

由图 5 可见,随着抽运光功率的升高,蒸气室吸收的抽运光功率先迅速升高,随后降低,最后趋于平稳,这一变化趋势与输出激光功率的变化趋势类似。这一现象表明:抽运光功率达到一定值后,若继续升高抽运光功率,蒸气室吸收的抽运光功率将达到饱和,此时抽运光功率不会明显升高。在出现饱和和吸收现象后,未被蒸气室吸收的抽运光功率可用于加热蒸气室,使得蒸气室温度达到碱金属激光器的工作温度,从而达到自加热的目的。

3.5 蒸气室温度的控制

为实现自加热碱金属激光器利用未被蒸气室吸收的抽运光加热蒸气室的温度控制机制,碱金属蒸气室采用玻璃-硅片-玻璃阳极键合技术制作^[16],蒸气室具有对称结构,在蒸气室外围贴附吸光片。硅片外观尺寸

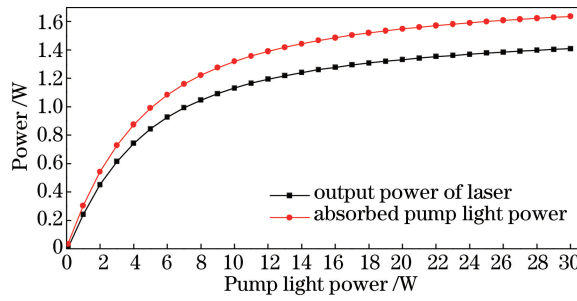


图 5 激光器输出功率和蒸气室吸收的抽运光功率随抽运光功率的变化

Fig. 5 Variations in output power of laser and absorbed pump light power of vapor cell with pump light power

为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 2\text{ mm}$; 内腔通孔直径为 2 mm , 长度为 2 mm ; 键合使用的玻璃型号为 BF33 玻璃, 厚度为 0.5 mm ; 吸光片的材料为内表面磨毛的无氧铜, 厚度为 0.5 mm ; 两端面通光孔直径为 0.9 mm ; 抽运光照功率加热吸光片的效率为 50% 。在抽运源线宽为 50 GHz 、光斑半径为 0.2 mm 的情况下, 基于有限元分析软件 ANSYS Workbench 14.5, 分析了对流换热系数 α 为 $10, 20, 30\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 时, 碱金属蒸气室在空气对流情况下能达到的温度 T 与总抽运光功率 P_p 的关系, 如图 6 所示。

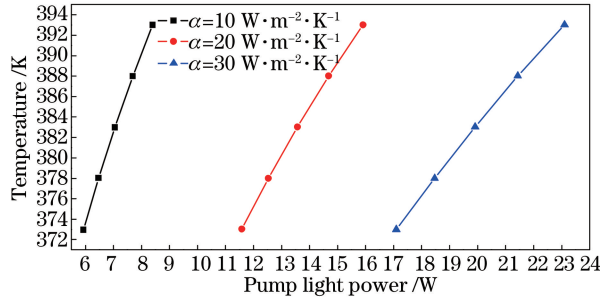


图 6 碱金属蒸气室温度与抽运光功率的关系

Fig. 6 Relationship between temperature of alkali metal vapor cell and pump light power

由图 6 可见, 对流换热系数为 $20\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 时, 13.57 W 的抽运光功率可将蒸气室温度加热至 $110\text{ }^\circ\text{C}$ 。抽运光功率升高 2.34 W 时, 蒸气室温度升高 $10\text{ }^\circ\text{C}$; 抽运光功率降低 1.99 W 时, 蒸气室温度降低 $10\text{ }^\circ\text{C}$; 当对流换热系数减小至 $10\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 时, 蒸气室温度加热至 $110\text{ }^\circ\text{C}$ 只需 7.05 W 抽运光功率; 增大对流换热系数至 $30\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 时, 蒸气室温度加热至 $110\text{ }^\circ\text{C}$ 时需要 19.91 W 的抽运光功率。通过优化抽运光功率及对流换热系数, 实现了对碱金属蒸气室温度的控制。

在对流换热系数为 $20\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 的情况下, 抽运光功率为 13.57 W 时可实现 1 W 的激光输出, 这一结果验证了短蒸气室碱金属激光器自加热激光输出的可行性。

4 结 论

基于双端抽运碱金属激光器理论模型, 研究了短蒸气室碱金属激光器的输出特性, 利用未被蒸气室吸收的抽运光功率加热碱金属蒸气室, 实现了碱金属激光器的自加热, 讨论了增益介质长度 L 、蒸气室温度 T 和抽运源线宽 $\Delta\nu_p$ 对自加热激光输出的影响。研究表明, 为满足 SERF 磁力计抽运的要求, 可选择增益介质长度为 2 mm 的短蒸气室; 使用普通外腔半导体激光器进行抽运, 在饱和吸收区间内通过提高和降低抽运光功率, 可在小范围内调节并优化蒸气室温度, 进而获得指定功率的自加热碱金属激光输出; 验证了短蒸气室碱金属激光器自加热输出激光的可行性, 并为自加热碱金属激光器实验研究的参数选择提供了理论依据和参考。

参 考 文 献

[1] Beach R J, Krupke W F, Kanz V K, *et al.* End-pumped continuous-wave alkali vapor lasers: Experiment, model, and

- power scaling[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2004, 21(12): 2151-2163.
- [2] Pitz G A, Stalnake D M, Guild E M, *et al.* Advancements in flowing diode pumped alkali lasers[C]. SPIE, 2016, 9729: 972902.
- [3] Liu Guobin, Sun Xianping, Gu Sihong, *et al.* Progress in high sensitive atomic magnetometers[J]. Physics, 2012, 41(12): 803-810.
刘国斌, 孙献平, 顾思洪, 等. 高灵敏度原子磁力计研究进展[J]. 物理, 2012, 41(12): 803-810.
- [4] Lee H J, Shim J H, Moon H S, *et al.* Flat-response spin-exchange relaxation free atomic magnetometer under negative feedback[J]. Optics Express, 2014, 22(17): 19887-19894.
- [5] Zhdanov B V, Rotondaro M D, Shaffer M K, *et al.* Potassium diode pumped alkali laser demonstration using a closed cycle flowing system[J]. Optics Communications, 2015, 354: 256-258.
- [6] Tan Yannan, Li Yimin, Liu Tong, *et al.* 16.8 W diode pumped rubidium vapor laser with Brewster angle structure [J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(3): 0302004.
谭彦楠, 李义民, 刘 通, 等. 布儒斯特角结构 16.8 W 半导体抽运铷蒸气激光器[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0302004.
- [7] Chen Fei, Gao Fei, Xu Yan, *et al.* Diode-pumped cesium vapor laser with high efficiency output[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0102011.
陈 飞, 高 飞, 徐 艳, 等. 激光二极管抽运铯蒸气激光实现高效率瓦级输出[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0102011.
- [8] Zhdanov B V, Knize R J. Diode-pumped 10 W continuous wave cesium laser[J]. Optics Letters, 2007, 32(15): 2167-2169.
- [9] Li Z Y, Tan R Q, Huang W, *et al.* A linearly-polarized cesium vapor laser with fundamental mode output and low threshold[J]. Chinese Physics Letters, 2014, 31(4): 044202.
- [10] 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.
- [11] Yang Z, Wang H Y, Lu Q S, *et al.* Theoretical model and novel numerical approach of a broadband optically pumped three-level alkali vapor laser[J]. Journal of Physics B, 2011, 44(8): 085401.
- [12] Shaffer M K, Lilly T C, Zhdanov B V, *et al.* *In situ* non-perturbative temperature measurement in a Cs alkali laser[J]. Optics Letters, 2015, 40(1): 119-122.
- [13] Li Zhiyong, Tan Rongqing, Huang Wei, *et al.* Experimental research on the stand-off detection of the methane pressure based on the Fourier transform infrared spectroscopy[J]. Chinese J Lasers, 2017, 44(3): 0301006.
李志永, 谭荣清, 黄 伟, 等. 傅里叶变换红外光谱技术测量甲烷气压的实验研究[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0301006.
- [14] Schreiber P, Hoefler B, Dannberg P, *et al.* High-brightness fiber-coupling schemes for diode laser bars[C]. SPIE, 2005, 5876: 587602.
- [15] Page R H, Beach R J, Kanz V K, *et al.* Multimode-diode-pumped gas (alkali-vapor) laser[J]. Optics Letters, 2006, 31(3): 353-355.
- [16] Liew L A, Knappe S, Moreland J, *et al.* Microfabricated alkali atom vapor cells[J]. Applied Physics Letters, 2004, 84(14): 2694-2696.
- [17] Kissel H, Köhler B, Biesenbach J. High-power diode laser pumps for alkali lasers (DPALs)[C]. SPIE, 2012, 8241: 82410Q.