

光泵 THz 激光器输出特性的影响因素分析

李 婷, 郭晓阳, 孟庆龙, 张 彬

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 设计稳定可靠的 THz 激光器, 缩小 THz 激光器的体积一直是 THz 领域的研究热点。基于速率方程组, 建立了光泵 THz 激光器的理论模型。数值模拟和分析了不同工作温度、腔内压强、腔尺寸、泵浦光波动等因素对 THz 激光输出产生的影响。研究表明: 泵浦光功率越高, THz 激光输出对工作温度的变化越敏感, 则越有必要建立稳定可靠的温度控制系统; 在保持功率输出一定的前提下, 通过适当提高 THz 激光腔内工作气体压强, 可以缩小 THz 激光器的体积; 泵浦光功率越低, THz 激光的输出性能对泵浦光功率波动及频率漂移越敏感, 此时, 需要对泵浦光稳定性进行控制, 更为关键的在于控制泵浦光的频率稳定性。

关键词: 光泵 THz 激光器; 速率方程组; 输出功率; 影响因素; THz 激光的稳定性; 频率漂移
中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)07-1980-06

Analysis of impact factors of output characteristics for optically pumped THz lasers

Li Ting, Guo Xiaoyang, Meng Qinglong, Zhang Bin

(School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Designing stable and reliable THz lasers as well as reducing dimension of THz lasers have always been a hot research spot in THz field. Based on the rate equations, the model of optically pumped THz lasers has been built up. The effects of the operating temperature, the pressure in cavity, the dimension of cavity and the stability of pump laser on the output characteristics of optically pumped THz lasers have been simulated and analyzed. The results show that it is necessary to realize the reliable temperature control since the output of THz laser becomes more and more sensible for the higher pump power. In order to reduce the dimension of THz lasers, the output power of THz lasers could be ensured by appropriately increasing the pressure of working gas in THz cavity. THz output characteristics are more sensitive to the fluctuation of pump power and the drift of pump frequency for the lower power of pump laser. Consequently, the stability of pump laser should be controlled, especially for the stability of pump frequency.

Key words: optically pump THz laser; rate equations; output power; impact factors; stability of THz laser; frequency drift

收稿日期: 2014-11-20; 修订日期: 2014-12-15

基金项目: 中国工程物理研究院太赫兹科学技术基金项目(CAEP THZ201305); 四川省教育厅创新团队计划资助(13TD0048)

作者简介: 李婷(1989-), 女, 硕士生, 主要从事强激光的传输与控制方面的研究。Email: liting31415@163.com

导师简介: 张彬(1969-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事强激光的传输与控制方面的研究工作。Email: zhangbinff@sohu.com

0 引言

太赫兹波在物体成像、环境监测、医疗诊断、生物工程、卫星通讯等领域均有广阔的应用前景和重大的科学价值^[1]。光泵 THz 激光器因其造价相对低廉,结构简单,而且可小型化集成的优点,目前仍然是 THz 波段较为常用的辐射源。在国内,中山大学^[2]在 1998 年前后在光泵 THz 理论和实验方面进行了较为深入的研究,但其工作主要集中在光谱分析和理论推导方面;华中科技大学利用高峰值功率、长脉冲的泵浦光,实现了高能量脉冲光泵浦 THz 激光器输出^[3-4]。美国 Coherent 公司利用光泵气体 CH₃OH 产生的 THz 激光^[5],应用于卫星上探测地球 O₃、OH⁻、等分子或离子分布,在 5 W 泵浦光功率情况下,其输出单模 2.52 THz 激光可达 125 mW,而器件质量则小于 22 kg,并于 2004 年搭载卫星进行了实验研究。在实际工作中,如何优化设计 THz 激光器,使其小型化,并能获得高而稳定的输出功率仍然是该领域的研究热点。

目前,光泵 THz 的产生及其输出特性的主要分析方法包括速率方程组^[3,6-7]和密度矩阵理论^[4,8]等,而速率方程则因其由一系列物理意义简单明了的概念和关系式组成,在研究激光器的输出强度特性上具有明显的优势。文中利用速率方程组建立了光泵 THz 过程的理论模型,并重点分析讨论了 THz 激光器工作温度、腔内气压、腔参数,以及泵浦光频率稳定性等因素对 THz 激光器输出性能的影响,以期对 THz 激光器的设计及优化提供理论参考。

1 理论模型

激光器的速率方程^[10]是表征激光器内光子数以及工作物质有关能级上的粒子数随时间变化的微分方程组,与激光相应的能级结构和工作粒子数在能级间的跃迁特性有关。甲醇具有较大的转动角动量和较高的扭转振动态,其小振幅振动模式下发射出的辐射频谱落在 1 000 cm⁻¹,而纯转动跃迁则落在微波或者 THz 波段上。文中采用三能级系统模型,甲醇分子的振动态由 5 个量子数表示,分别为 V, J, n, τ 和 K ,使用 CO₂ 激光器的 9P(36) 线泵浦甲醇分子振动能级的有关过程如图 1 所示。图中, W_{ij} ($i, j=$

1, 2, 3) 代表受激辐射概率, A_{ij} ($i, j=1, 2, 3$) 表示自发辐射概率, n_i 为对应能级上的粒子数。

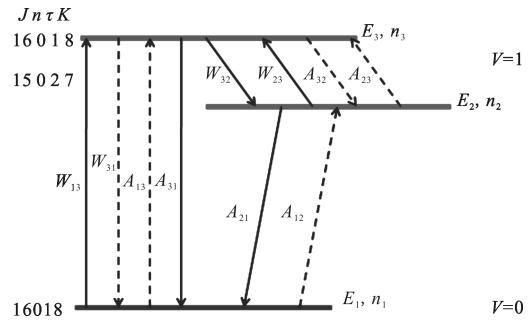


图 1 简化三能级系统模型

Fig.1 Simplified three-level model

图 1 中 E_1 为基态,在泵浦光的作用下,基态上的粒子被抽运到激发态 E_3 上 ($(0, 16, 0, 1, 8) \rightarrow (1, 16, 0, 1, 8)$)。如果抽运速率足够高,而 E_3 上的自发跃迁与无辐射跃迁到 E_2 和 E_1 的概率都很小,则很容易在 E_3 与 E_2 之间形成粒子束反转分布 ($(1, 16, 0, 1, 8) \rightarrow (1, 15, 0, 2, 7)$)。此时,受激辐射将占主导地位,从而会产生 118.83 μm 的 THz 激光。

在泵浦过程中,基态能级 E_1 上的粒子向激光上能级 E_3 跃迁以受激辐射跃迁为主;激光上能级 E_3 的粒子向激光下能级 E_2 跃迁也以受激辐射跃迁为主;激光上能级 E_3 的粒子向基态能级 E_1 跃迁以自发辐射跃迁为主; E_2 能级为高能级,因而 E_2 能级向 E_1 能级的自发辐射跃迁大于 E_1 能级向 E_2 能级的自发辐射跃迁概率。即 $W_{13} \gg A_{13}, W_{32} \gg A_{32}, W_{23} \gg A_{23}, A_{31} \gg W_{31}, A_{21} \gg A_{12}$ 。

由此可将各能级集居数密度随时间变化的方程组表示为:

$$\begin{aligned} \frac{dn_3}{dt} &= n_1 W_{13} - n_3 W_{32} + n_2 W_{23} - n_3 A_{31} \\ \frac{dn_2}{dt} &= n_3 W_{32} - n_2 W_{23} - n_2 A_{21} \\ n_1 + n_2 + n_3 &= n \\ \frac{dN}{dt} &= n_3 W_{32} - n_2 W_{23} - \frac{N}{\tau} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: N 为光子数密度; τ 为光子寿命,可由 $\tau = \frac{L}{\delta c}$ 计算得到; L 为腔长; δ 为腔损耗; c 为光速。

在泵浦光的作用下,基态能级 E_1 上的粒子数抽运到激光上能级 E_3 的受激跃迁概率为 W_{13} ,可以

表示为:

$$W_{13}=B_{13}\rho_b \quad (2)$$

式中: ρ_b 为泵浦光能量密度, $\rho_b=Nh\nu_p$, h 为普朗克常量; ν_p 为泵浦光频率; B_{13} 、 B_{31} 为爱因斯坦系数, 其关系为 $B_{13}=(g_3/g_1)B_{31}$, 并有:

$$B_{3j}=4\pi|\mu_{3j}|^2g(\nu, \nu_0)/(3h^2\varepsilon_0) \quad (3)$$

式中: μ_{3j} 为电偶极矩; $g(\nu, \nu_0)$ 为吸收线型函数; ε_0 为吸收线型函数的中心频率。

受激跃迁概率可以表示为:

$$W_{32}=\sigma_{32}(\nu, \nu_0)cN \quad (4)$$

式中, 受激发射截面为:

$$\sigma_{32}(\nu, \nu_0)=\frac{A_{32}c^2}{8\pi\nu_0^2}g(\nu, \nu_0) \quad (5)$$

利用关系式: $A_{32}/B_{32}=8\pi h\nu^3/c^3$ ^[10], 再结合公式(3)、(5), 即可计算得到 W_{32} 。进一步由关系式 $W_{32}/W_{23}=B_{32}/B_{23}$, $B_{23}=(g_2/g_3)B_{32}$, 可以计算得到 W_{23} 。

值得指出的是, 当激光腔内甲醇气压较高时, 其吸收谱线呈洛伦兹线型, 即:

$$g_H(\nu, \nu_0)=\frac{\Delta\nu_H}{2\pi}\frac{1}{(\nu-\nu_0)^2+\left(\frac{\Delta\nu_H}{2}\right)^2} \quad (6)$$

式中: $\Delta\nu_H$ 为均匀加宽线宽。

当气压较低时, 多普勒加宽占优势。此时, 吸收谱线呈高斯线型, 即:

$$g_D(\nu, \nu_0)=\frac{2}{\Delta\nu_D}\left(\frac{\ln 2}{\pi}\right)^{1/2}\exp\{-4\ln 2\left(\frac{\nu-\nu_0}{\Delta\nu_D}\right)^2\} \quad (7)$$

式中: $\Delta\nu_D$ 为吸收线宽。

当既考虑均匀加宽又考虑多普勒加宽时, 求解受激发射截面所使用的吸收谱线表达式为:

$$g(\nu, \nu_0)=[g_H^2(\nu)+g_D^2(\nu)]^{1/2} \quad (8)$$

激光上能级通过自发辐射跃迁回到基态能级 E_1 的自发辐射概率为:

$$A_{i1}=\pi\Delta\nu_H \quad (i=2, 3) \quad (9)$$

在压强为几个大气压以下时, 实际气体近似遵循理想气体状态方程, 可以由理想状态方程得到三能级系统激光辐射过程中的有效分子数, 即:

$$N=\frac{PV}{kT} \quad (10)$$

式中: P 为压强; V 为体积; k 为玻耳兹曼常量; T 为气体温度; N 为分子数。

于是, 公式(1)可进一步表示为:

$$\begin{aligned} \frac{dn_3}{dt} &= n_1 \frac{g_3}{g_1} B_{31} \rho_b + \left[\frac{g_3}{g_2} n_2 - n_3 \right] \sigma_{32}(\nu, \nu_0) Nc - n_3 A_{31} \\ \frac{dn_2}{dt} &= \left[n_3 - \frac{g_3}{g_2} n_2 \right] \sigma_{32}(\nu, \nu_0) Nc - n_2 A_{21} \end{aligned} \quad (11)$$

$$n_1 + n_2 + n_3 = n$$

$$\frac{dN}{dt} = \left[n_3 - \frac{g_3}{g_2} n_2 \right] \sigma_{32}(\nu, \nu_0) Nc - \frac{N}{\tau}$$

于是, THz 激光输出可由腔内光子数密度计算得到, 即:

$$P_{\text{out}} = \frac{N}{2} cSh\nu_T T \quad (12)$$

式中: T 为输出镜的透射率; S 为光腔横截面积; ν_T 为输出 THz 激光的频率。

2 THz 输出特性的影响因素分析

采用四阶龙格-库塔法数值求解速率方程组即公式(11), 可以求解出各能级粒子数以及光子数的变化, 进而利用公式(12)计算得到 THz 激光器的输出功率。表 1 给出了数值模拟使用的有关参数, 均参考 J.M.Lourtioz^[11]文中所列数值。

表 1 CH₃OH 分子气体参数

Tab.1 CH₃OH molecule gas parameters

μ_{32} /C·m	μ_{31} /C·m	$\Delta\nu_H$ /MHz·torr ⁻¹ /MHz	$\Delta\nu_D$ /MHz	$n_3(0)$	$n_2(0)$	g_3/g_2	g_3/g_1
2.23×10^{-30}	1.79×10^{-30}	28	7.9	0.001 83	n_0	0.002 64	n_0 1.065 1

2.1 工作温度的影响

实际应用中, THz 激光器不可能工作在严格的恒温条件下。例如, NASA 的卫星 Aura 搭载了 Coherent 公司生产的 THz 激光器^[5], 该卫星每日绕地球 14.5 圈, 即使有优良的恒温系统, 由于地球背阳面与向阳面的交替存在, 因而对卫星的运行环境也存在影响, 卫星工作温度呈周期性变化。为此, 计算了工作温度对 THz 激光输出产生的影响。图 2 给出了 THz 激光输出功率随激光器工作温度的变化。计算所用参数为: 腔内气压 10 Pa, 激光腔长 750 mm、直径 40 mm。

由图 2 可知, 在相同的工作温度下, 泵浦光功率越高, 则 THz 激光的输出功率越高; 当工作温度上升时, THz 激光输出功率呈现直线下降的趋势, 几乎与温度呈线性关系。进一步计算图中每条直线的斜

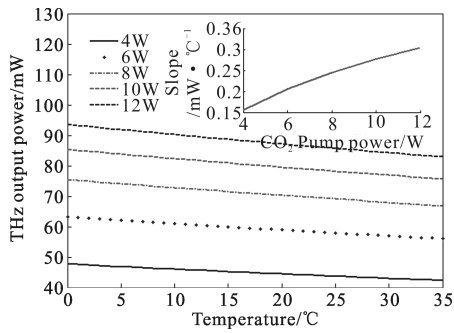


图 2 不同泵浦光功率情况, THz 激光的输出功率随工作温度的变化

Fig.2 THz output power versus operating temperature with different pump powers

率,得到泵浦功率与各直线斜率的变化曲线,如图 2 所示。可以看出,随着泵浦光功率的提高,THz 激光输出对工作温度变化的斜率越来越大,说明此时的 THz 激光输出对工作温度的变化越来越敏感。例如,当泵浦功率由 4W 增加至 12W 时,变化率由 0.15 mW/°C 增加到 0.33 mW/°C。由此可见,当泵浦功率越高时,需要对 THz 激光器进行温度校正的幅度越大。

2.2 腔内气压的影响

为了对 THz 激光器腔内甲醇气压进行优化,图 3 给出了不同泵浦功率条件下,THz 激光输出功率随着腔内甲醇压强的变化。可以看出,随着腔内压强升高,THz 激光的输出功率整体上升;当腔内压强较低时,输出功率随腔内压强升高而上升幅度较大。然而,当压强较强时,输出功率的上升幅度开始变缓,进而逐渐趋于饱和。进一步分析图 3 可知,泵浦功率越低,则越先趋于饱和。由此可见,适当增加腔内的甲醇压强可提高 THz 光的输出功率,但若饱和后再进一步增加压强,则 THz 输出功率也并不会明显提升。

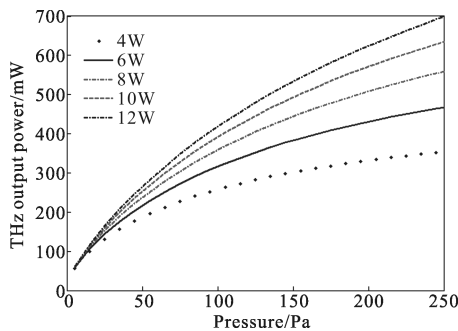


图 3 不同泵浦光功率情况下, THz 激光的输出功率随腔内气压的变化

Fig.3 THz output power versus pressure with different pump powers

2.3 腔尺寸的影响

在许多实际应用中,更加倾向于激光器的小型化与集成化,这对腔体积提出了更高的要求。图 4 给出了不同腔长以及腔直径的情况下 THz 激光输出功率的变化。从图 4 可以看出,在腔内压强不变的条件下,当腔长增加时,输出功率将明显提高,同时,当腔直径增大时,输出功率也有一定程度的增加,但其增加幅度远不如腔长变化的影响。

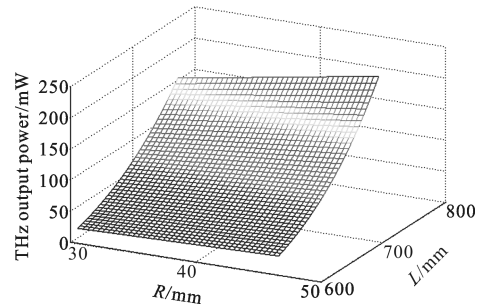


图 4 THz 光的输出功率随腔尺寸的变化

Fig.4 THz output power versus dimensions of laser resonator

结合以上有关腔内压强及腔尺寸的分析,如果要减小腔的体积,则可通过适当增大腔内压强的方法来保证 THz 激光的有效输出。图 5 进一步给出了 THz 输出功率随腔长及腔内压强变化,其中,(a)为三维分布;(b)为等高线分布。

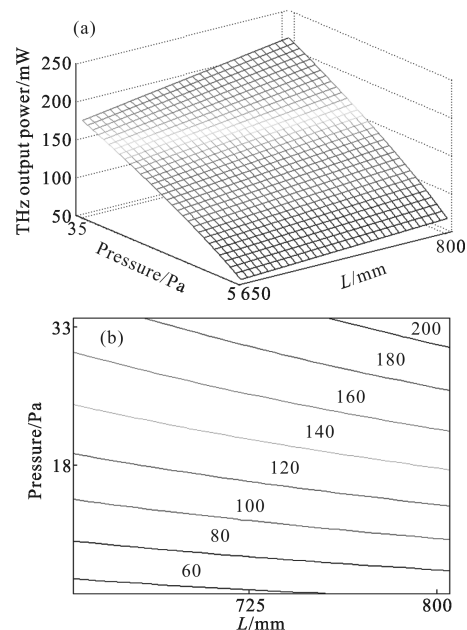


图 5 THz 光的输出功率随压强及腔长的变化

Fig.5 THz output power versus pressure and cavity length

从图 5 可以看出,对于特定的输出功率来说,腔

内压强与腔长呈现减函数的关系,因此,为了保持一定的功率输出,在缩短腔长的情况下,则必须适当提高腔内的压强。

2.4 泵浦光稳定性对 THz 光产生的影响

在太赫兹成像、雷达探测、相干通信等许多应用领域中,对 THz 源的稳定性极为关注,而当 CO₂ 泵浦激光的输出产生波动时,会对 THz 激光的输出稳定性产生影响。目前,Coherent 公司的 THz 激光系统中设计并制造了频率稳定模块,以保证 THz 激光输出的稳定性^[5]。

图 6 数值模拟了 CO₂ 泵浦激光频率发生漂移时,THz 激光输出功率随频率漂移量的变化。

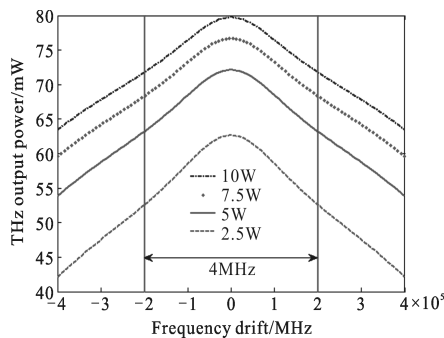


图 6 THz 光的输出功率随泵浦光频率漂移的变化

Fig.6 THz output power versus frequency drift of pump laser

从图 6 可以看出,当泵浦光输入功率增加时,THz 激光输出功率将整体提高;当 CO₂ 激光频率没有发生漂移,即认为此时泵浦光频率处于 CH₃OH 吸收曲线的吸收峰处时,可以获得最高的 THz 激光输出。然而,当 CO₂ 泵浦光频率产生一定漂移时,THz 激光的输出功率将明显下降。

为了进一步说明 CO₂ 泵浦激光频率发生漂移时,对 THz 激光输出功率造成的影响。图 7 计算了泵浦光在 4MHz 频率范围内波动时,THz 激光输出功率波动的 PV 值随泵浦光强的变化。分析图 7 可知,在相同的泵浦光频率漂移范围内,随着泵浦光功率的增加,THz 激光的输出稳定性逐渐好转。由此可见,泵浦功率越弱,则 THz 激光的输出对泵浦光频率漂移越敏感。因此,为了获得高性能、高稳定性的 THz 源,需要将 CO₂ 泵浦激光的频率漂移控制在一定范围内。

在实际应用中,由于激励电流不稳定性,也可能造成 CO₂ 激光器输出功率产生波动,为了进一步分析

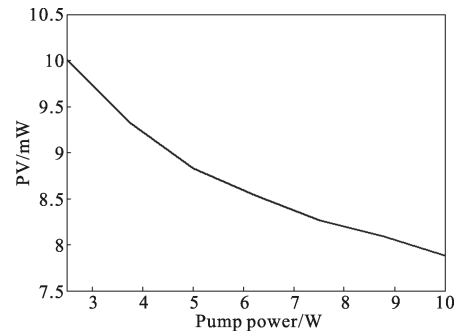


图 7 泵浦光频率在 4 MHz 范围内波动时,THz 激光输出功率波动 PV 值随泵浦光功率的变化

Fig.7 PV value of fluctuations of THz output power versus different pump powers within 4MHz frequency drift

泵浦光功率波动对 THz 激光输出功率稳定性的影响,图 8 给出了 THz 激光的输出功率随泵浦光功率的变化。可以看出,当泵浦光功率较低时,THz 激光输出功率随泵浦光功率的增加而急剧增大。然而,当泵浦光功率较高时,输出功率的上升幅度开始变缓,进而逐渐趋于饱和。如图 8 所示,还给出了 THz 激光的输出斜率曲线,可以明显地看出,当泵浦光功率较低时,THz 激光的变化幅度较大,斜率变化明显,而随着泵浦光功率的进一步提高,THz 激光的变化幅度逐渐趋于平缓。由此可见,当泵浦光功率越弱,则 THz 激光输出对泵浦光功率波动也越敏感。

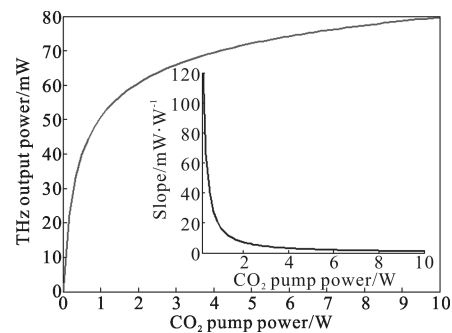


图 8 THz 激光的输出功率随泵浦光功率的变化

Fig.8 THz output power versus pump power

为了进一步比较泵浦光功率波动与频率漂移对 THz 激光输出功率稳定性的影响程度,图 9 计算模拟了泵浦光功率波动及频率漂移对 THz 激光输出功率的影响。

分析图 9 可知,若要控制 THz 光输出功率稳定在 1 mW 范围内时,泵浦光的频率需稳定在 1 MHz 内,而功率需稳定在 2% 以内。根据常见 CO₂ 激光

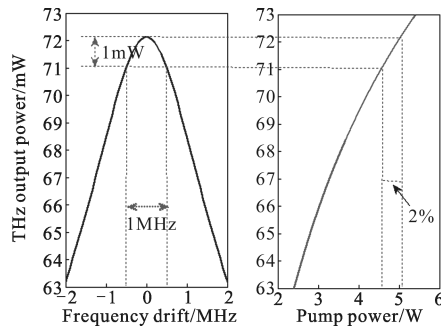


图 9 泵浦光功率波动及频率漂移对 THz 激光输出的影响

Fig.9 Influence of power fluctuation and drift frequency of pump laser on THz output power

器的参数,例如,Edinburgh Instruments 公司推出的 PL5 激光器,其功率稳定性为 $\pm 1\%$,频率稳定性为 ± 2 MHz,可见现有的 CO_2 激光器很容易满足 THz 泵浦源功率稳定在 2% 以内的要求,而难以达到频率稳定性在 1 MHz 范围内的要求。因此,为了满足 THz 泵浦源稳定性的要求,应当重点控制泵浦光的频率稳定性。为此,可以利用光声稳频技术对 CO_2 泵浦激光的频率漂移进行有效的控制^[9,12]。

3 结 论

基于速率方程组建立了光泵 CH_3OH 分子 THz 激光的理论模型,计算分析了影响 THz 输出特性的主要因素。研究表明:当 THz 激光器工作温度上升时,其输出功率将线性下降,并且,随着泵浦光功率的增加,THz 输出功率对温度的变化越来越敏感。因此,为了确保 THz 输出的稳定性,需要设计并制造可靠的恒温控制系统和闭环补偿系统;当 THz 激光腔内甲醇气体压强不变时,随着腔长或腔直径的增加,THz 激光的输出功率均会提高;当腔尺寸不变时,增大腔内压强也可以提高 THz 激光的输出功率。因此,为了保证 THz 激光输出功率,若要缩小 THz 激光器的尺寸,可以适当增大腔内压强; CO_2 泵浦光的输出稳定性也会对 THz 激光输出产生影响,泵浦光功率越低,THz 激光的输出稳定性对泵浦光功率波动及频率漂移越敏感,其中,控制泵浦光的频率漂移更为关键,可以利用光声稳频技术对 THz 激光的输出稳定性进行优化。文中的结论可为高性能 THz 激光器的设计及优化提供

理论参考。

参考文献:

- [1] Ye Quanyi, Yang Chun. Recent progress in THz sources based on photonics methods[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(1): 1–11. (in Chinese)
- [2] Huang X, Qing J, Zheng X, et al. Experimental study on miniature pulsed CH_3OH far-infrared laser [J]. *Int J IR & MMW*, 1997, 18(3): 619–625.
- [3] Qi Chunchao. Studies on generating mechanise of optically pumped pulsed terahertz laser and properties of key components [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2010. (in Chinese)
- [4] Jiu Zhixian. Performace studies on pulsed THz laser pumped by tunable TEA CO_2 laser[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2010. (in Chinese)
- [5] Eric R Muller, Robert Henschke, William E Robotham, et al. Terahertz local oscillator for the microwave limb sounder on the aura satellite[J]. *Appl Opt*, 2007, 46(22): 4907–4915.
- [6] Henningsen J O, Jensen H G. The optically pumped far-infrared laser: rate equations and diagnostic experiment [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1975, 11 (6): 248–252.
- [7] Weiss C O. Pump Saturation in molecular far-infrared lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1976, 12(10): 550–584.
- [8] Ran Yong, Qin Jiayin, Zhu Chongping. et al. The theoretical model and cancellation method of optically pumped submillimeter wave laser(I)—The semiclassical density matrix theory[J]. *Chinese Journal of Atomic and Molecular Physics*, 2001, 18(2): 127–132. (in Chinese)
- [9] Zhang Zebo, Zhu Wensen, Zhao Yuying. et al. Opto-acoustic frequency stabilization of a CW CO_2 laser [J]. *Applied laser*, 1984, 4(6): 273–276. (in Chinese)
- [10] Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong. et al. Principles of Lasers[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
- [11] Lourtioz J M, Adde R. Diagnostic experiments and modeling of 118 μm CH_3OH laser [J]. *J Physique*, 1980 (41): 251–258.
- [12] Yuan Dandan, Hu Shuling, Liu Honghai. et al. Reserch of laser frequency stabilization [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 081401. (in Chinese)