

金属波导连续光泵气体太赫兹激光器

严强^{1,2}, 孔维鹏^{1,2}, 王度^{1,2*}, 秦瑀^{1,2}, 邹明芮^{1,2},
罗振飞^{1,2}, 李贻宇^{1,2}, 李磊^{1,2}, 周逊^{1,2}

(1. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 成都 610041;
2. 中国工程物理研究院 太赫兹研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要: 针对紧凑型光泵气体太赫兹激光器(OPTL)技术, 设计并研制了全金属波导结构的气体太赫兹(THz)激光器原理样机. THz 激光器工作介质为 CH₃OH 气体, 最佳工作气压 30 Pa, 在波长 9.69 μm、连续功率 44 W 的 9P(36) 支 CO₂ 激光泵浦下, 实验测得在 2.52 THz 频点输出功率 150 mW, 光子转换效率为 8.4%. 研究 THz 激光输出功率与 CH₃OH 工作气压、泵浦光功率的关系, 以及 THz 激光输出稳定性, 并通过压电陶瓷对 THz 激光腔长进行精密调节, 同时测量输出功率的变化情况, 讨论了金属波导 THz 激光器的纵模特性. 实验工作与结果为下一步紧凑型折叠波导腔全金属 OPTL 的研制提供了参考.

关键词: 太赫兹; 光泵气体 THz 激光器; 高功率连续 THz 激光; 金属波导
中图分类号: TN248.2 **文献标识码:** A

Optically pumped metallic waveguide cw terahertz gas laser

YAN Qiang^{1,2}, KONG Wei-Peng^{1,2}, WANG Du^{1,2*}, QIN Yu^{1,2}, ZHOU Ming-Rui^{1,2},
LUO Zhen-Fei^{1,2}, LI Ze-Yu^{1,2}, LI Lei^{1,2}, ZHOU Xun^{1,2}

(1. Research Center of Laser Fusion, Chinese Academy Engineering Physics, Chengdu 610041, China;
2. Terahertz Research Center, Chinese Academy Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China)

Abstract: A prototype of optically-pumped terahertz (THz) gas laser (OPTL) with metallic waveguide was designed and manufactured. The output power of THz laser radiation is 150 mW, pumping by a 44 W, 9P36 (9.69 μm) cw CO₂ laser. The THz laser medium is CH₃OH vapour, and the pressure is 30 Pa. The photon conversion efficiency is 8.4%. The relationships of THz laser power versus working gas pressure and pump power are given. The stability of the output power in ten minutes was measured. The variation of THz laser power was measured by adjusting the length of the THz laser cavity precisely through a piezoelectric translator. The characteristics of the longitudinal modes in the metallic waveguide THz laser are discussed. The experimental work and results are helpful for further researches on the compact folded all-metal waveguide OPTL.

Key words: terahertz, optically-pumped terahertz gas lasers, high power cw THz laser, metallic waveguide

PACS: 2.55.-f, 42.55.Lt, 87.50.U-, 42.79.Gn

引言

太赫兹(THz)辐射具有良好的介质穿透性、较低

的光子能量(1.2~12.4 meV)、宽带宽、大通信传输容量等优点,在太赫兹成像、太赫兹雷达、环境监测、生物医学等领域具有非常广阔的应用前景和重大的

收稿日期: 2016-03-18, 修回日期: 2016-08-11

Received date: 2016-03-18, revised date: 2016-08-11

基金项目: 国家自然科学基金(61605184), 中国工程物理研究院太赫兹科技基金(TH2015-020508), 中国工程物理研究院与四川大学协作创新联合基金(XTCT2014010), 中物院激光聚变研究中心青年人才基金

Foundation items: Supported by the National Science Foundation of China (61605184), CAEP THz Science and Technology Foundation (TH2015-020508) and Collaborative Innovation Joint Foundation of CAEP and Sichuan University (XTCT2014010)

作者简介(Biography): 严强(1988-), 男, 四川成都人, 研究实习员, 硕士, 主要研究领域为太赫兹激光技术等. E-mail: yanqiang668@126.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: wdxz@foxmail.com

科学价值^[1-3]. 目前,能实现连续输出功率瓦级以上的高功率相干太赫兹辐射源主要有自由电子激光器(FEL)和光泵气体 THz 激光器(OPTL)两种. 采用可调谐 CO₂ 激光作为泵浦源的 OPTL 具有高功率、高光束质量的特点,通过使用不同工作气体(CH₃OH、NH₃、CF₃H 等)同时对泵浦 CO₂ 激光波长的选支调谐,可在 0.3 ~ 5 THz 的宽频段内获得数百根谱线输出,且相较于 FEL 体积和成本小很多,能够在室温下持续稳定运行,是一种较为实用的太赫兹光源. J. Farhoomand 等人^[4]以 125 W 稳频 CO₂ 激光器为泵浦源,注入石英波导 CH₃OH 气体介质 THz 激光器,获得了 1.25 W、118.8 μm(2.52THz)的激光输出. K. Nakayama 等^[5]采用 164 W 的泵浦激光,以 CH₃OD 为工作气体,在 57.2 μm 和 47.6 μm 波长分别获得 1.6 W 与 0.8 W 的功率输出,用于 ITER 项目的等离子体诊断. 相干公司的 E. R. Mueller^[6]研制的 20 mW、2.52 THz 紧凑型 OPTL,用于 AURA 卫星星载探测器,是小型化 OPTL 的重要代表. 国内中山大学、华中科技大学、天津大学的等单位以 TEA CO₂ 激光为泵浦源,对脉冲 OPTL 激光器进行了深入的理论和实验研究,并在 OPTL 的参数优化和性能提升以及小型化方面进行了大量研究^[7-11]. 以上实验报道的 OPTL 主要采用石英玻璃波导管,易于加工实现和成本控制. 采用铝合金、铜或不锈钢等金属材料制作 THz 激光波导管时,涉及到长管精加工、抛光、镀膜以及高真空处理,加工工艺较为复杂. 但经过良好处理的金属管壁对泵浦激光和 THz 激光的波导损耗更低,且更易于进行紧凑型或复杂结构设计(如侧面泵浦、多路折叠、矩形波导)实现设备的小型化. 德国 GREAT 项目的机载小型化 4.75 THz OPTL 本地振荡源采用侧面泵浦的金属波导设计,虽然输出功率较低,但具有较高的 Q 值,在一些较弱的谱线上也能获得输出^[12-13]. 哈尔滨工业大学的田兆硕课题组^[14]进行了全金属 OPTL 的研制与实验研究,采用射频板条 CO₂ 激光器作为泵浦光源,获得了脉冲 THz 激光输出. 为进行紧凑型折叠腔连续 OPTL 的研制,本文设计了全金属波导 THz 激光器原理样机,并针对工作气压、泵浦光功率、稳定性、腔长与纵模匹配等问题进行实验研究.

1 激光器结构

设计的气体 THz 激光器系统如图 1(a)所示,包括 CO₂ 激光泵浦源,泵浦光传输聚焦光路和 THz 激光器. 其中,THz 激光器由输入输出耦合镜、PZT 腔

长调节机构和不锈钢波导腔体组成. 通过传输聚焦光路系统和小孔输入耦合镜将 CO₂ 泵浦激光注入到 THz 激光腔内,并通过光路调节实现泵浦激光和腔内 THz 激光场的空间模式耦合,减少泵浦光的损耗并提高 THz 工作气体的吸收. 通过输出耦合镜实现对泵浦光的全反射和 THz 激光的透射输出. 图 1(b)为全金属波导 THz 激光器结构示意图.

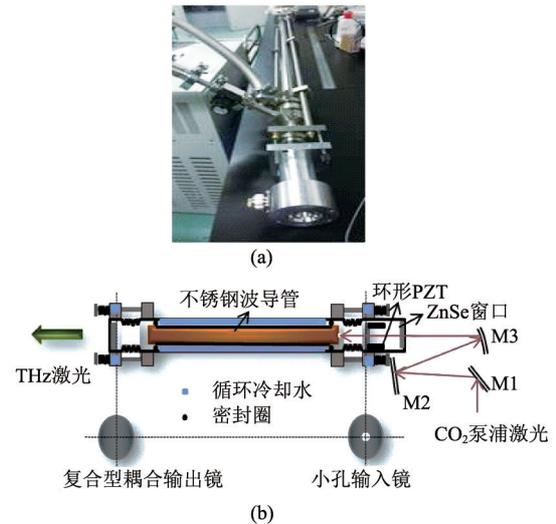


图1 金属波导 THz 激光器结构, (a) 样机实物图; (b) 结构示意图

Fig. 1 Structure of metallic waveguide THz laser: (a) the prototype, (b) schematic of the structure

连续 OPTL 中 THz 激光工作介质一般为低压气体,具有较窄的吸收线宽. 对于 CH₃OH 气体,在 300 K、100 mTorr 下的吸收带宽约为 60 MHz,因此泵浦光的频率稳定性影响 THz 激光输出功率的关键因素^[15]. 本文采用慢速轴流、直流放电、光栅选支 CO₂ 激光作为泵浦源,腔长 1.8 m,光栅常数 150 l/mm,压电陶瓷(PZT)控制 ZnSe 输出实现输出频率与 CH₃OH 气体的吸收带宽匹配,在 9P(36) 支线输出连续功率 40 W 左右,对应的 CH₃OH 输出谱线为 118.8 μm(2.52 THz).

THz 激光谐振腔为平凹腔设计,输入耦合镜为镀金铜镜,中心开孔 2.2 mm,曲面半径 15 m. OPTL 常用的输出方式有小孔耦合输出和金属网栅耦合输出两种. 小孔耦合不存在波长选择特性,工艺简单易于制备,但对于波长较长的 THz 激光存在明显的硬边衍射,从而降低了输出光束质量,并且通常只对小孔处电场强度较强的模式具有较好耦合. 金属网栅输出耦合器对 THz 波长和偏振态具有选择性,避免了硬边衍射,因此输出光束质量较好,并可通过网栅

设计实现特定波长的选择性输出^[16],但制备较为复杂,长期高功率泵浦激光照射与反复抽真空条件下工作易损坏.本文采用小孔耦合输出方式,耦合镜为石英基底+高反介质膜+镀金层三层结构.Z向切割石英晶体基底厚度2 mm,光轴方向对2.52THz波透过率高达70%,对9~11 μm泵浦光几乎全吸收.高反介质膜层为Ge+ZnS多层膜,对泵浦激光反射率>99%,对THz激光损耗较小.镀金层中间开孔直径7 mm(未优化).波导腔为304不锈钢管,腔长1.5 m,内径26 mm,内壁抛光,并进行高温除气与清洁真空处理,避免析出H₂O增加THz损耗,波导外壁套有水冷管套,冷却水温恒定在15℃.输入镜通过环形压电陶瓷实现腔长的精密调节,调节精度5 nm,闭环调节范围100 μm.输入端由双面增透的ZnSe窗口镜密封,在CO₂激光9P(36)支线透过率大于99%.

2 实验结果与讨论

工作气压是OPTL的一个主要参数,对于CH₃OH连续THz激光器,在一定的泵浦功率和腔长条件下,存在对应的最佳工作气压.实验测量9P(36)支线CO₂激光泵浦功率43.6 W时,CH₃OH工作气压和输出功率的关系,如图2所示.图中数据点为实际功率值,由Scientech H410型THz功率计测得.由图2可以看出,CH₃OH气压从3 Pa到30 Pa,随着气压的升高,参与激光过程的CH₃OH分子数增加,泵浦吸收和太赫兹增益占据主导,输出THz功率逐步增加.当气压达到最佳工作气压30 Pa,太赫兹输出功率达到最大.气压高于30 Pa后,处于激光上能级的分子间无辐射碰撞过程增多,THz激光功率随气压升高而下降.

在一定范围的注入泵浦功率下,THz激光功率随泵浦功率同步增加,在发生饱和前二者为线性关系.图3为实验测量的THz激光功率与泵浦功率的关系,实验气压30 Pa,水冷温度15℃恒定,图3表明THz激光输出功率与泵浦功率呈线性关系.实验中改变CO₂激光工作气压或工作电流时,同时调节CO₂激光腔长使THz激光输出最高,使CO₂激光频率与CH₃OH的吸收谱线重合,并将CO₂激光输出功率稳定在所需功率,最高输出可达44 W.实验采用的CO₂激光输出功率有限,所以太赫兹输出的饱和效应没有表现出来.为进行金属波导的纵模特性研究,降低THz激光器的损耗,设计的输出耦合镜的小孔尺寸为7 mm,该参数并未优化.通过

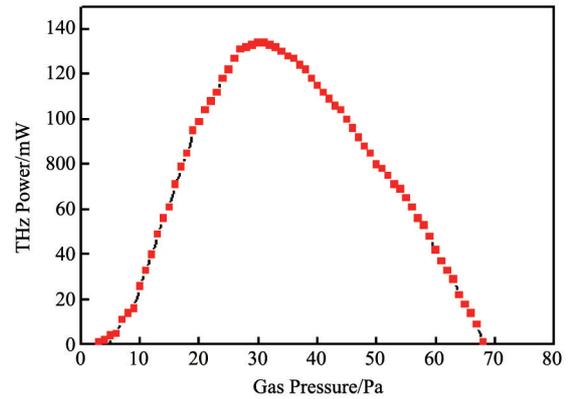


图2 THz输出功率随CH₃OH气压变化的关系

Fig. 2 THz laser power versus the gas pressure of CH₃OH

增加小孔尺寸,THz激光输出功率仍有提高空间.

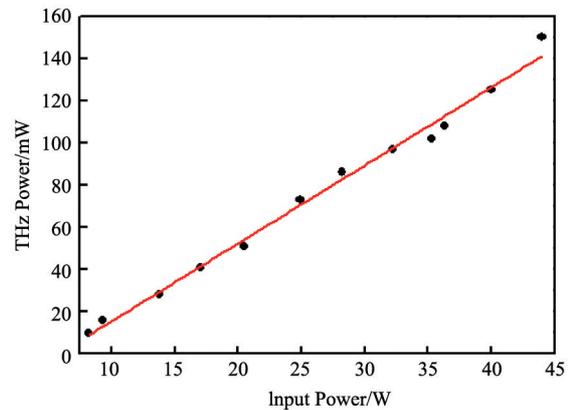


图3 THz输出功率与泵浦功率的关系

Fig. 3 THz laser power versus the pump power of CO₂ laser

当泵浦光输入功率为44 W时,输出THz激光功率达最高值150 mW,能量转换效率为3.4‰.光子转换效率根据曼利-罗伊(Manley-Rowe)定律^[17]:

$$\eta = \frac{E_{\text{THz}}}{E_{\text{IR}} \frac{\lambda_{\text{IR}}}{2\lambda_{\text{THz}}}}, \quad (1)$$

计算值为8.4%.下一步通过各参数的优化及真空环境、加工精度等工程优化,输出功率和转换效率仍有较大的提升空间.

CH₃OH气体OPTL的增益谱宽约为10 MHz,远远小于THz谐振腔(腔长1~2 m)的纵模间隔.因此,腔长发生微米量级的变化,都会造成THz激光功率的较大波动.通过调节环形PZT的控制电压主动改变腔长,并测量THz激光功率的变化,实验结果如图4所示.实验条件为CH₃OH工作气压30 Pa,冷却水温为15℃,泵浦功率44 W.图4中功率较高的相邻峰对应基模振荡,腔长变化间距约等于半个

波长 $119/2 \mu\text{m}$, 可以作为太赫兹激光工作波长的近似估计. 由于每个数据点测量都将 CO_2 激光调节到最佳工作状态, 排除了 CO_2 激光频率漂移引起同一模式对应峰值高度的变化, 因此对应同一模式的峰值变化可能是由 PZT 的线性度导致激光器谐振腔失调引起的. 各个模式对应功率的周期性复现明显, 说明腔长精密调节系统设计具有较好的线性度. 在输出端放置金属网栅法布里-泊罗干涉仪及 Golay 探测器装置, 测得 THz 激光输出波长为 $119\mu\text{m} (\pm 0.2 \mu\text{m})$. 由图 4 可以看出, 在最佳工作腔长处, 腔长变化 $\pm 2 \mu\text{m}$, 输出功率波动可达 50% 以上. 因此, 要获得相对稳定的连续 THz 激光输出对腔长控制的精度和稳定性、环境温度稳定性、泵浦波长和功率的稳定性均有很高的要求. 实验结果还表明, 金属波导 THz 激光器中同时存在多个模式可以振荡输出, 而在石英波导中大多只有不超过两个模式能够起振, 这是由于金属波导同时存在多个损耗相近且较低的 TE_{1m} 模式和 TE_{0n} 模式所致^[18]. 金属波导 THz 激光器的这一特性在某些增益较低的气体介质以及相关弱谱线 THz 激光的研究方面具有应用价值.

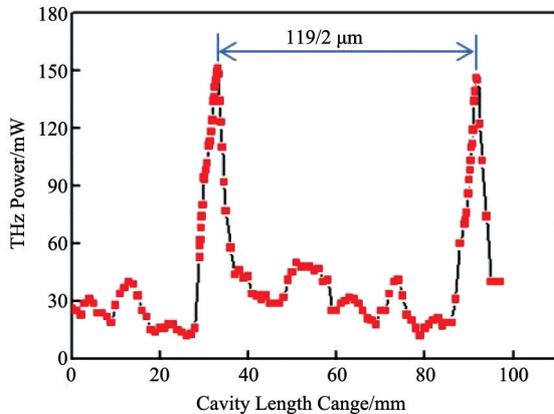


图 4 THz 激光输出与谐振腔腔长变化的关系
Fig. 4 THz laser power versus the cavity length of the THz laser

由图 4 可知, 在输出功率最高点附近, 输出功率对 THz 激光器的腔长变化十分敏感. 同时由于 CH_3OH 气体吸收带宽窄, THz 激光对于泵浦光功率频率漂移也特别敏感. 因此, 若不对稳定性问题作出针对性的考量, 气体 THz 激光器输出稳定性普遍较差. 本文实验中暂未加入主动稳定控制系统, 采用机械结构被动稳频设计, 减少系统振动及腔长热变形, 同时采用环形 PZT 实现 5 nm 精度的腔长控制. 如图 5 所示, 室温恒定, CO_2 激光稳定在 9P(36) 支线输出, 最佳工作点在 10 min 内 THz 激光器稳定平均

输出功率 141 mW , 波动约为 $\pm 5\%$, 具有较好的输出稳定性. 测量期间, CO_2 激光功率的波动在 $\pm 2\%$ 以内. 如果对 THz 腔长实时反馈控制, 可以进一步提高太赫兹输出的稳定性.

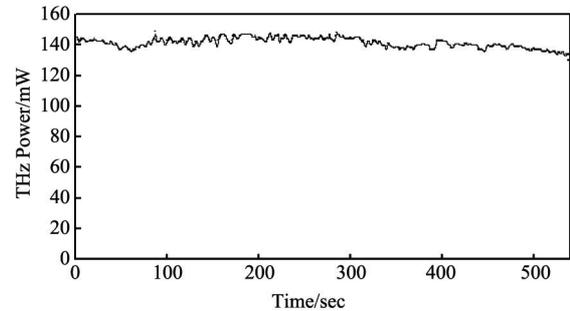


图 5 THz 激光输出功率随时间的变化
Fig. 5 THz laser power versus time

3 结语

设计研制了金属波导连续光泵太赫兹激光器, 并进行了一系列实验研究. 在连续功率 38 W 、9P(36) 支线 CO_2 激光泵浦下, 实验获得 150 mW 、 $118.8 \mu\text{m}$ (2.52 THz) 的连续 THz 激光输出, 光子转换效率 8.4% , 10 min 内功率波动约为 $\pm 5\%$. 通过进一步改善金属波导质量以减小损耗、优化真空环境降低水汽带来的损耗以及各参数 (如输出小孔直径、镜片与波导口的结构与距离) 的优化, 本实验中的 THz 激光输出功率仍有较大提升空间. 测量了 THz 激光输出功率与工作气压、泵浦功率以及腔长变化的关系, 对金属波导 THz 激光器的特性进行了探讨. 研究工作及相关实验结果为紧凑型金属波导 OPTL 的设计、研制与优化提供了参考.

References

- [1] Federici J F, Schulkin B, Huang F, *et al.* Thz imaging and sensing for security applications: explosives, weapons and drugs [J]. *Semicond. Sci. Technol*, 2005, **20**(7): S266 – S280.
- [2] FU Shi-you, TIAN Zhao-shuo, YI Fu-long, *et al.* Development and prospect for optically pumped THz laser [J]. *J. Harbin Institute of Technology* (付石友, 田兆硕, 衣福龙, 等. 光泵 THz 激光器进展及其应用前景. *哈尔滨工业大学学报*), 2008, **40**(3): 435 – 439.
- [3] Davies A G, Burnett A D, Fan W, *et al.* Terahertz spectroscopy of explosives and drugs [J]. *Material Today*, 2008, **11**(3): 18 – 26.
- [4] Jam Farhoomand, Herbert M. Pickett. Stable 1.25 watts cw far infrared laser radiation at the $119 \mu\text{m}$ methanol line [J]. *Int. J. Infrared and Millimeter waves*, 1987, **8**(5): 441 – 447.

- 的红外小目标检测算法. *红外与毫米波学报*, 2011, **30**(2), 156 - 162.
- [5] Jiajia Zhao, Zhengyuan Tang, Jie Yang, *et al* Infrared small target detection using sparse representation[J]. *Syst. Eng. Electron.* 2011, **22**(6):897 - 904.
- [7] Liu Z. Chen, C, Shen X, *et al* Detection of small objects in image data based on the nonlinear principal component analysis neural network. [J], *Opt. Eng.*, 2005, **44**(9):093 - 099.
- [8] Cao Y, Liu, R. Yang J, Infrared small target detection using PPCA[J], *Int. J. Infrared Millimeter Waves*, 2008, **29**(4):385 - 395.
- [9] Liu R, Zhi H, Infrared point target detection with Fisher linear discriminant and kernel Fisher linear discriminant [J]. *Infrared Millimeter Terahertz Waves*, 2010, **31**(12):1491 - 1502.
- [10] Yuan Hong-gang, Sun Wei dong, Weak and small target detection based on multi-threshold classification and backward verification for infrared image sequence[J], *Image Graphics*, **14**(8):1583 - 1589.
- [11] Zhao Jingjing, Chen Haixing, Liu Xingtong, Yang Chuan-dong, Preprocessing of infrared images with small target [J], *Signal Process*, 2009: **25**(7):1088 - 1091.
- [12] Huang N. E. Shen, Z, Long S. R, *et al* The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [C], Royal Soc. London. 1998, **454**(1998) 903 - 1005.
- [13] Aberu E, Lightstone M, Mitra S. K, *et al* A new efficient approach for removal of impulse noise from highly corrupted images, *IEEE Trans. Image Process* [J], 1996, **5**(2):1012 - 1025.
- [14] Deng Y. Kenney, C, Moore M. S, Peer group filtering and perceptual color image quantization, Proc [C]. IEEE Int. Symp. Circuits Syst. New York. 1999, **4**(1999):21 - 24.
- [15] Nunes J. C. Bouaoune, Y. Delechelle, E, *et al* Image analysis by bidimensional empirical mode decomposition, *Image Vision Computer* [J]. 2003, **21**(2003):1019 - 1026.
- [16] Yang Z, Qi D., Yang L, Signal period analysis based on Hilbert-Huang transform and its application to texture analysis [C], Intl. Conf. Image Graphics, 2004, 30 - 433.
- [17] Hariharan H. Gribok, A, Abidi M, *et al* Image fusion and enhancement via empirical mode decomposition [J]. *Pattern Recognition. Res*, 2006, **1**(1):16 - 32.
- [18] Huang K. Mao, X, Detectability of small targets [J], *Phys. Technol.* 2009, **53**(09):208 - 217.
- [19] Shiozacki A, Edge extraction using entropy operator [J], *Computer. Vision Graphics Image Process.* 1986, **36**(1986):1 - 9.
- [20] He Deng, Jianguo Liu, Zhong Chen, Infrared small target detection based on modified local entropy and EMD [C], *Chin. Opt. Lett.* 2010, **8**(1):24 - 28.
- [21] Xu Rong-Ping, Yang Lei, Small Target Tracking Approach Combined The Merits Of Two Track I ING Frame Work Under Infrared Complex Background, [J], *J. Infrared Millim. Waves.* (徐蓉萍, 杨磊. 红外复杂背景中一种融合两类跟踪框架优点的小目标跟踪算法. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(5), 355 - 360.
- ~~~~~
- (上接第 68 页)
- [5] Nakayama K, Tazawa H, Okajima S, *et al.* High-power 47.6 and 57.2 μm CH_3OD lasers pumped by continuous-wave 9R(8) CO_2 laser [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, **75**(2):329 - 322.
- [6] Mueller E R, Henschke R, Robotham W E. Terahertz local oscillator for the microwave limb sounder on the aura satellite [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(22):4907 - 4915.
- [7] QIN J Y, HUANG X, LUO X Z, *et al.* Spectral characteristics comparison of pulsed optically pumped NH_3 and CH_3OH far-infrared laser [J]. *Int. J. Infrared Millimeter Waves*, 1999, **20**(8):1515 - 1524.
- [8] ZHANG Ping, ZHANG Xun, HUANG Xiao, *et al.* The study of two longitudinal mode optically pumped super radiant THz laser and cavity THz laser [J]. *J. Optoelectronics · Laser* (张萍, 张迅, 黄晓, 等. 双纵模光泵超辐射式和腔式 THz 激光器的研究. *光电子 · 激光*), 2002, **13**(4):332 - 335.
- [9] BAO Yan-xian, HUANG Xiao, LUO Xi-zhang. Choice of three-energy-level groups on optically pumped sub-millimeter wave laser medium [J]. *J. Optoelectronics · Laser* (保延翔, 黄晓, 罗锡璋. 参与光泵亚毫米波激光过程的介质三能级组的选取. *光电子 · 激光*), 2004, **15**(11):1320 - 1323.
- [10] QI Chun-chao, ZUO Du-Luo, LU Yan-zhao, *et al.* An efficient photon conversion efficiency ammonia terahertz cavity laser [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(12):124201.
- [11] HE Zhi-zhong, YAO Jian-quan, SHI Hua-feng, *et al.* Semiclassical theory of optically pumped D_2O gas terahertz laser [J]. *Acta Physica Sinica* (何志红, 姚建铨, 时华锋, 等. 光泵重水气体产生 THz 激光的半经典理论分析. *物理学报*), 2007, **56**(7):5802 - 5807.
- [12] Rolf Güstena, Paul Hartoghd, Heinz-Wilhelm Hübers, *et al.* GREAT: The German first light heterodyne instrumentation for SOFIA. Infrared Spaceborne Remote Sensing and Instrumentation XV, San Diego, CA, 2007 [C].
- [13] Mueller E R. Optically pumped THz laser technology [J/OL]. <http://www.coherent.com/downloads/OpticallyPumpedLaser.pdf>.
- [14] TIAN Zhao-shuo, WANG Jing, FEI Fei, *et al.* Study of optically pumped all-metal terahertz laser [J]. *Chinese J. Laser* (田兆硕, 王静, 费非, 等. 光抽运全金属太赫兹激光器研究. *中国激光*), 2010, **37**(9):2323 - 2327.
- [15] GUO Xiao-yang, LI Ting, WANG Du, *et al.* Influence of frequency shift of pump laser on photoacoustic signal for frequency stabilization [J]. *Infrared and Laser Engineering* (郭晓阳, 李婷, 王度, 等. 泵浦激光频率漂移对光声稳频信号的影响. *红外与激光工程*), 2015, **44**(6):1746 - 1751.
- [16] KONG Wei-peng, WANG Du, GUO Chao, *et al.* A theoretical investigation and experiment of hybrid metal-mesh output coupler [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (孔维鹏, 王度, 郭超, 等. 复合型金属网栅耦合输出镜. *红外与毫米波学报*), 2015, **34**(5):587 - 592.
- [17] Stellan Jacobsson. Optically pumped far infrared lasers [J]. *Infrared Phys.* 1989, (29)5:853 - 874.
- [18] Hodges D T, Hartwick T S. Waveguide laser for the far infrared (FIR) pumped by a CO_2 laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1973, **23**(5):252 - 253.