

文章编号: 0258-7025(2010)09-2323-05

光抽运全金属太赫兹激光器研究

田兆硕 王 静 费 非 杨君国 张延超 付石友 王 骥

(哈尔滨工业大学(威海)信息光电子研究所, 山东 威海 264209)

摘要 设计并研制了以全金属射频波导 CO₂ 激光器为抽运源的太赫兹 (THz) 激光器, 其中 THz 激光工作气体为 CH₃OH 气体, 在波长为 9.69 μm 的 P₉(36) 支 CO₂ 脉冲激光抽运情况下, 获得了脉冲 THz 激光输出。实验上测量了脉冲抽运光及 THz 激光波形及重复频率, 抽运光由宽带室温 HgCdTe 探测器测试, 最高重复频率为 5 kHz。THz 激光由热释电探测器接收, 由于受探测器限制, 实验上测量的 THz 激光波形失真, 最高重复频率为 1 kHz。另外研究了输出 THz 激光强度与工作气压的关系, 测出此系统最佳工作气压为 10 Pa 左右。研制的 THz 激光器为全金属结构, 不用水冷, 具有结构简单、体积小的优点, 可以为相关研究提供参考。

关键词 激光器; 太赫兹激光器; 光抽运; 全金属

中图分类号 TN248.2 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103709.2323

Study of Optically Pumped All-Metal Terahertz Laser

Tian Zhaoshuo Wang Jing Fei Fei Yang Junguo Zhang Yanchao Fu Shiyou Wang Qi

(Information Optoelectronics Research Institute, Harbin Institute of Technology at Weihai, Shandong, Weihai 264209, China)

Abstract The terahertz (THz) laser pumped by all-metal radio frequency (RF) waveguide CO₂ laser is designed and researched. Its working gas is CH₃OH. The pulsed THz laser output is obtained with the pump of P₉(36) CO₂ pulsed laser (9.69 μm). The THz laser waveform and pulse repetition frequency (PRF) for the pumped laser and THz laser are measured in experiment. The relationship between laser intensity and working gas pressure is also given. The PRF can be up to 5 kHz for the pumped laser detected by HgCdTe detector with high bandwidth. The THz laser is measured by pyroelectric detector and the measured waveform is distorted and the maximum PRF is only 1 kHz due to the limitation of the detector. The relationship between THz laser intensity and working gas pressure is also studied and the best working pressure is about 10 Pa. The designed THz laser has all-metal structure, which needs no water cooling. It has the advantages of simple structure and small size, which are helpful for further researches.

Key words lasers; terahertz laser; optically pumped; all-metal

1 引 言

光抽运太赫兹 (THz) 激光是目前实用化的 THz 辐射光源, 在物体成像、环境监测、医疗诊断、生物工程和 THz 雷达等方面具有重大的科学价值和广阔的应用前景^[1~6]。

光抽运 THz 激光有连续和脉冲两种工作方式。目前, 多数脉冲光抽运 THz 激光器抽运源采用 TEA CO₂ 激光器, 覆盖波长范围从毫米到几十微米量级。采用 TEA CO₂ 激光器作为抽运源, 虽然输出激光峰值功率高, 但是重复频率低, 一般为每秒 10 次。为提

高脉冲重复频率, J. Bae 等^[7]研制了电源加机械调制 Q 开关 CO₂ 激光器, 在重复频率 1 kHz 时, 输出激光峰值功率超过 1 kW。以此激光器抽运 CH₃F, 在脉冲重复频率 500 Hz 时, 获得 496 μm 激光峰值功率 6.5 W, 脉冲宽度 100 ns。R. C. Viscovinini 等^[8]用宽带可调谐波导 CO₂ 激光器抽运 CD₃OD 介质, 发现了 36 条新激光谱线, 抽运光可以工作在连续或长脉冲状态, 抽运光脉冲峰值功率为 100 W, 重复频率 800~1200 Hz。近年国际上科研人员探索光抽运 THz 激光新谱线的工作一直在进行, 不断有新的光抽运 THz

收稿日期: 2010-02-04; 收到修改稿日期: 2010-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(60668016)和新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0240)资助课题。

作者简介: 田兆硕(1970—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光技术及其应用等方面的研究。E-mail: tianzhaoshuo@126.com

激光谱线被报道^[9~11]。

在国内,中山大学的 J. Y. Qin 等、华中科技大学的 Qi Chunchao 等^[12~15]以 TEA CO₂ 激光器作为抽运源对分子气体 THz 激光器进行了较深入的理论与实验研究,其研究的重点是光抽运 NH₃ 气体分子产生的 THz 激光,在激光的激射机理、频谱特性、激光器的工作参数进一步优化、仪器小型化等方面进行了大量的系统深入的研究。天津大学何志红等^[16,17]对 TEA CO₂ 激光抽运重水气体进行了理论与实验研究,获得了 385 μm 波长的脉冲 THz 激光输出。

光抽运 THz 激光器的抽运源一般采用玻璃结构的水冷直流激励 CO₂ 激光器或 TEA CO₂ 激光器,体积大,结构复杂,脉冲重复频率最高为 1 kHz 左右。本文在前期研究的基础上^[18,19],设计并研究了全金属射频(RF)波导 CO₂ 激光抽运的 THz 激光器,最高脉冲重复频率可以达到 5 kHz。抽运源采用全金属射频波导 CO₂ 激光器,产生 THz 激光系统也采用全金属结构,因此不用水冷仅用风冷即可工作,而且在较低脉冲重复频率情况下可以不用冷却,大大减小了整个 THz 激光系统的体积,并且结构简单。在实验上

应用此 THz 激光系统,充入 CH₃OH 工作气体,测试了 THz 激光输出波形以及在不同抽运光脉冲重复频率的情况下 THz 激光输出特性,研究了 THz 激光输出强度与工作气体压力的关系。

2 激光器结构

设计的 THz 激光系统如图 1 所示,主要包括两部分:一部分是抽运源,另外一部分为产生 THz 激光系统。抽运源为光栅选支的全金属射频波导 CO₂ 激光器,波导长度 700 mm,波导截面 6 mm×6 mm,射频电源频率 80 MHz,可以通过脉冲调制射频电源的方式输出脉冲激光。激光器采用半外腔结构,输出窗为两面镀增透膜的 ZnSe 窗片,透射中心波长为 9.7 μm,透射率为 99.5%,光栅放置在接近透射窗片处,光栅常数为 150 lines/mm,一级反射率为 85%,光栅与压电陶瓷(PZT)固定为一体并且角度可调,激光从光栅零级输出,通过调整光栅角度可选择激光输出谱线,调节 PZT 上的电压可控制激光腔长,调谐输出激光频率。

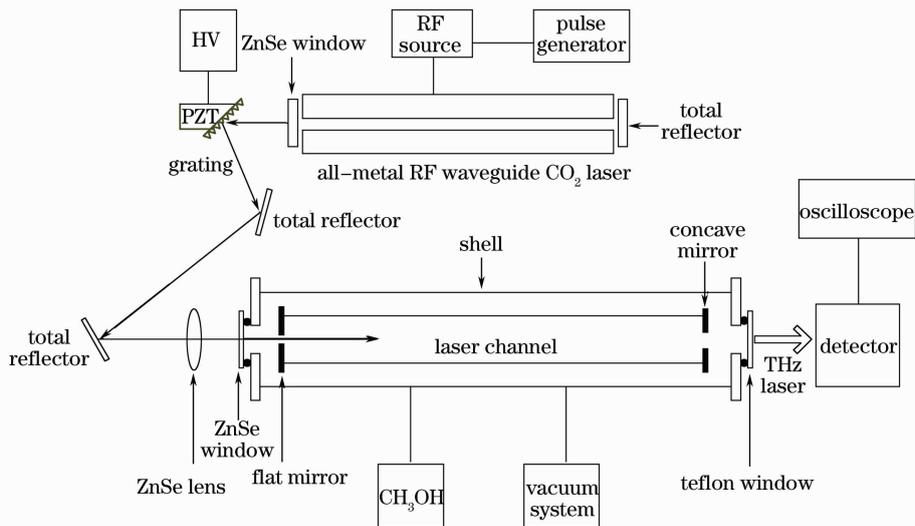


图 1 射频波导 CO₂ 激光抽运全金属 THz 激光器结构

Fig. 1 Structure of all-metal terahertz laser pumped by RF waveguide CO₂ laser

产生 THz 激光系统由谐振腔、激光通道、配气系统、窗口和外壳 5 部分组成,激光谐振腔采用传统的平-凹谐振腔,抽运激光输入及 THz 激光输出采用小孔耦合输入输出方式,其中平面反射镜为镀金铜镜,中心口径 2 mm 作为抽运激光的输入孔,凹面反射镜曲率半径 4 m,中心口径 10 mm,作为 THz 激光的输出孔。激光通道采用长 150 mm 内径 40 mm 的铜管,内表面抛光以减少抽运光的损耗。配气系统包括充气系统及抽气系统,充气系统为普

通烧杯瓶装的液态分析纯 CH₃OH,由于充气时激光通道内的气压低,通过气化充入 CH₃OH 工作气体。窗口包括输入输出窗口,输入窗口是透射中心波长为 9.7 μm 的 ZnSe 窗片,位于平面反射镜的中心孔前,压紧 O 型橡胶圈并固定到外壳的端面;输出窗口是聚四氟乙烯薄片,位于凹面反射镜的中心孔后,不透射抽运激光而对 THz 激光透射率较高。激光通道放置在圆筒形状的不锈钢外壳内,配气系统通过真空管道与外壳相连,谐振腔镜的调整架与

外壳端面法兰连接,可调整反射镜角度,使谐振腔工作状态最佳。

THz 激光的工作过程是:光栅选支的全金属射频波导 CO₂ 激光器输出的抽运激光经过两片全反射镜改变光路后,由两面镀有增透膜焦距为 185 mm 的 ZnSe 透镜聚焦,焦点位于 THz 激光系统的输入孔,抽运光在腔内多次反射抽运 CH₃OH 工作气体,产生的 THz 激光由输出孔输出,透过聚四氟乙烯片入射到热释电探测器上,通过示波器观察 THz 激光输出。

3 实验结果及讨论

3.1 抽运激光输出测试

由于探测 THz 激光的热释电探测器需要工作在脉冲方式,因此抽运激光以脉冲方式工作,对于脉冲射频电源激励的 CO₂ 激光器,重复频率可达到 5 kHz。通过调整 CO₂ 激光器的光栅角度可在一定范围内获得多条谱线激光输出,由 CO₂ 激光光谱仪测试输出激光谱线^[15,16],选择 CO₂ 激光的 P₉(36) 支谱线作为抽运激光,其输出波长为 9.69 μm。输出的激光由宽带室温 HgCdTe 探测器探测,其波形如图 2 所示,脉冲激光波形包括主脉冲和拖尾部分,主脉冲宽度 700 ns,峰值功率约为 50 W,拖尾长度受脉冲射频电源的调制宽度控制,可达百微秒量级。

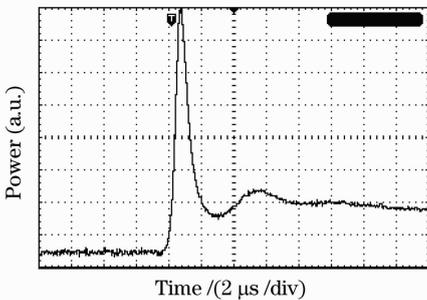


图 2 CO₂ 抽运激光波形

Fig. 2 Waveform of CO₂ pumped laser

3.2 THz 激光输出测试

通过配气系统在 THz 激光器内充入 CH₃OH 工作气体,根据相关文献,在 CO₂ 激光的 P₉(36) 支谱线作为抽运光情况下,可以输出 118.8 μm (2.5 THz) 的 THz 激光。开启抽运激光器,使抽运光处于低重复频率工作 (90 Hz),调节激光器 PZT 的电压,以调谐抽运光频率,使 THz 激光输出最强,通过示波器可以观察所产生的 THz 光波形及强度变化,如图 3 所示。可以看出探测到的 THz 激光近似为三角波,这是由于目前选用的探测器带宽较低,

为 100 kHz,响应时间为 10 μs 量级,而抽运光脉冲的主脉冲宽度为 700 ns 左右,并且附带几十微秒的拖尾。脉冲 THz 激光输出波形应与抽运光类似^[20],也包括主脉冲与较强的拖尾,只是强度比抽运光低。因此虽然能探测到光信号,但是不能真实反映脉冲 THz 激光的输出波形。对于类似激光器阈值抽运功率在 1 W 左右,而激光拖尾在数十微秒范围内都在 3 W 以上^[21,22],因此推断出输出 THz 激光的拖尾也至少到几十微秒。需具备高速 THz 波探测器才能测量准确数据。总之,测量的 THz 脉冲激光波形为近似三角波,主要有两个原因:一是热释电探测器带宽小,二是输出的 THz 激光与抽运光一样存在较长的拖尾。

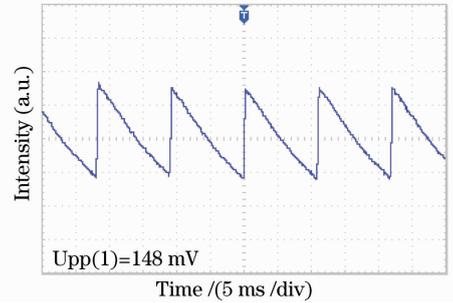


图 3 测量的 THz 激光输出

Fig. 3 Detected waveform for THz laser

通过调整 THz 激光器腔内 CH₃OH 气体压强,研究激光器腔内工作气体压强与产生 THz 激光强度之间的关系。在 CO₂ 激光器抽运光脉冲重复频率为 90 Hz 条件下,当腔内气体压强在 2~21 Pa 时,测得 CH₃OH 气压与 THz 激光输出强度曲线如图 4 所示。图中的点为实际测量的数据,曲线为理论拟合曲线,可以看出,充入 CH₃OH 气压较低时,所产生的 THz 激光输出强度随气体压强的增加而增大,在腔内气体压强为 10 Pa 左右时,THz 激光

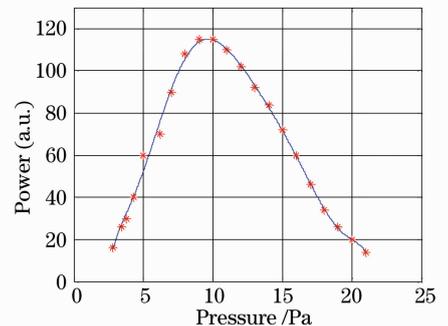


图 4 CH₃OH 气压与 THz 激光输出强度的关系

Fig. 4 Curve of THz laser intensity versus CH₃OH gas pressure

输出强度最大,继续增加气压,所产生的 THz 激光输出随气压增加而减小。

3.3 高重复频率 THz 激光输出测试

抽运光脉冲重复频率可以达到 5 kHz,理论上输出的 THz 激光也应达到 5 kHz,因此在提高抽运光脉冲重复频率情况下,测量 THz 激光输出波形,实验中观察到在示波器上显示的 THz 激光信号随着脉冲重复频率的提高逐渐减小,在抽运光重复频率 200 Hz 时观察到的信号如图 5 所示,继续提高抽运光重复频率,最高 1 kHz 就几乎观察不到信号了,这是由于热释电探测器带宽过低所致,如果应用高带宽探测器就可以真实显示高重复频率脉冲 THz 激光的真实波形。

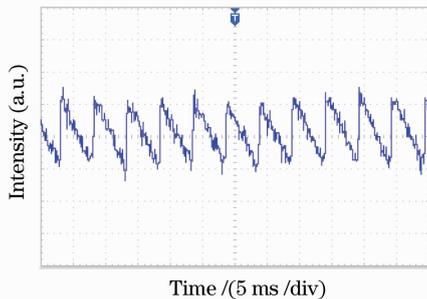


图 5 重复频率为 200 Hz 的 THz 激光输出

Fig. 5 THz laser output with pulse repetition frequency of 200 Hz

4 结 论

研究了以光栅选支的全金属射频波导 CO₂ 激光器为抽运源的 THz 激光器,整套装置为全金属结构,具有不用水冷、结构简单、体积小的优点,可以以连续或脉冲方式工作,实验测量了脉冲 THz 激光的输出。进一步实验需要完善和改进的地方主要有: 1) 实验中使用的 CH₃OH 为市场上常见的分析纯,纯度仅为 99.5%,进一步将采用更高纯度的光谱纯 CH₃OH 气体。2) 目前采用手动调谐加在 PZT 上的电压方法,控制抽运光频率,以获得最强的 THz 激光输出,手动控制方式输出激光强度的稳定性差,进一步研究工作考虑使用自动控制方式,提高输出稳定性。3) 由于探测器带宽的限制,既无法反映脉冲 THz 激光的真实波形又不能探测到高重复频率 THz 激光,因此进一步研究工作将考虑购买宽带的 THz 波探测器或与有条件的单位合作测量。

参 考 文 献

1 E. R. Mueller, R. Henschke, W. E. Robotham. Terahertz local oscillator for the microwave limb sounder on the aurasatellite

[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(22): 4907~4915

2 J. F. Federici, B. Schulkin, F. Huang *et al.*. THz imaging and sensing for security applications-explosives, weapons and drugs [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2005, **20**(7): S266~S280

3 Fu Shiyou, Tian Zhaoshuo, Yi Fulong *et al.*. Development and prospect for optically pumped THz laser[J]. *J. Harbin Institute of Technology*, 2008, **40**(3): 435~439

付石友, 田兆硕, 衣福龙等. 光泵 THz 激光器进展及其应用前景[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, **40**(3): 435~439

4 Wu Liang, Ling Furi, Liu Jinsong *et al.*. Detection of gases with terahertz spectroscopy techniques[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(7): 29~35

吴亮, 凌福日, 刘劲松等. 太赫兹光谱技术在气体检测中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2009, **46**(7): 29~35

5 Yang Kun, Zhao Guozhong, Liang Chengsen *et al.*. Comparison between pulsed terahertz imaging and continuous-wave terahertz imaging [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2853~2858

杨昆, 赵国忠, 梁承森等. 脉冲太赫兹波成像与连续波太赫兹成像特性的比较[J]. 中国激光, 2009, **36**(11): 2853~2858

6 Li Qi, Chi Xin, Shan Jixin *et al.*. Terahertz absorption characteristics of polytetrafluoroethylene[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 756~759

李琦, 迟欣, 单纪鑫等. 聚四氟乙烯材料的太赫兹特性[J]. 中国激光, 2008, **35**(5): 756~759

7 J. Bae, T. Nozokedo, H. Shirai *et al.*. An EMQ-switched CO₂ laser as a pump source for a far-infrared laser with a high peak power and a high repetition [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, **25**(7): 1591~1594

8 R. C. Viscovini, A. Scalabrin, D. Pereira. CD₃OD optically pumped by a waveguide CO₂ laser: new FIR laser lines [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(6): 916~918

9 R. C. Viscovini, F. C. Cruz, A. Scalabrin *et al.*. CHD₂OH optically pumped by a waveguide CO₂ laser: new far-infrared laser lines from the CD₂ wagging vibrational mode [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2002, **38**(8): 1029~1030

10 A. D. Michele, K. Bousbahi, G. Carelli *et al.*. The ¹³CH₃OH far-infrared laser: new lines and assignments [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2004, **45**(4): 243~248

11 A. Moretti, G. Moruzzi, F. Strumia *et al.*. New terahertz laser lines from ¹³CD₃OH pumped by regular and hotbands CO₂ laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2008, **44**(11): 1104~1106

12 J. Y. Qin, X. Huang, X. Z. Luo *et al.*. Spectral characteristics comparison of pulsed optically pumped NH₃ and CH₃OH far-infrared laser [J]. *Int. J. Infrared Millimeter Waves*, 1999, **20**(8): 1515~1524

13 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*, 2002, **13**(4): 332~335

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[J]. 光电子·激光, 2002, **13**(4): 332~335

14 Bao Yanxiang, Huang Xiao, Luo Xizhang. Choice of three-energy-level groups on optically pumped sub-millimeter wave laser medium [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(11): 1320~1323

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[J]. 光电子·激光, 2004, **15**(11): 1320~1323

15 Qi Chunchao, Zuo Duluo, Lu Yanzhao *et al.*. An efficient photon conversion efficiency ammonia terahertz cavity laser [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(12): 124201

16 He Zhihong, Yao Jianquan, Shi Huafeng *et al.*. Semiclassical theory of optically pumped D₂O gas tera-Hz laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(7): 5802~5807

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[J]. 物理学报, 2007, **56**(7): 5802~5807

- 17 He Zhihong, Yao Jianquan, Ren Xia *et al.*. Experimental and theoretical research on a compact superradiant optically pumped D₂O gas terahertz laser[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(1): 35~37
何志红, 姚建铨, 任 侠等. 紧凑型超辐射光泵重水气体 THz 激光器的研制[J]. *光电子·激光*, 2008, **19**(1): 35~37
- 18 Y. D. Sun, Z. S. Tian, S. Y. Fu *et al.*. Study of active frequency stabilized CO₂ laser for THz radiation [C]. *SPIE*, 2008, **7727**: 77270Y
- 19 Sun Zhenghe, Wang Jing, Fu Shiyu *et al.*. A tunable RF excited waveguide CO₂ laser with dual-channel, high synchronism and coelectrode[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2009, **20**(8): 997~999
孙正和, 王 静, 付石友等. 双通道共电极双波长射频波导 CO₂ 激光器[J]. *光电子·激光*, 2009, **20**(8): 997~999
- 20 Y. D. Sun, S. Y. Fu, J. Wang *et al.*. Optically pumped terahertz lasers with high pulse repetition frequency: theory and design[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(2): 127~129
- 21 J. Heppner, C. O. Weiss, U. Hubner *et al.*. Gain in CW laser pumped FIR laser gases [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1980, **QE-16**(4): 392~402
- 22 V. Beltrán, J. Flores, J. Jiménez. Continuous-wave far-infrared laser, instrumentation and development [J]. *J. Mexican Society of Instrumentation*, 1997, **3**(8): 31~38