

文章编号: 2095-4980(2017)04-0529-05

便携式太赫兹辐射器光泵浦源

刘 兵¹, 赵 刚¹, 彭绪金¹, 刘亚萍¹, 徐文韬²

(1.西南技术物理所 驻西南技术物理所军代室, 四川 成都 610041; 2.天津大学 精密仪器学院, 天津 300072)

摘 要: 为在太赫兹波段的遥感生物探测预警雷达系统、光电对抗、成像探测以及高速通信提供小型野外使用的军用全固态紧凑太赫兹辐射器, 研制了一种小型便携式太赫兹辐射器的光泵浦源, 采用了无热电制冷器(TEC)温度控制的二极管泵浦Nd:YAG固体激光, 激光输出能量150 mJ, 脉冲宽度最小6 ns, 激光重频最大30 Hz, 激光束散角最小约1 mrad。用这样的泵浦源进行光泵浦TPO-THz, 产生的1.63 THz波的单脉冲能量为2.98 μ J, 对应的THz波能量转换效率为 1.92×10^{-5} 。

关键词: 便携式; 光泵浦; 太赫兹辐射器

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201704.0529

Portable optical pump source for terahertz radiator

LIU Bing¹, ZHAO Gang¹, PENG Xujin¹, LIU Yaping¹, XU Wentao²

(1. Military Deputy Room of Chinese People's Liberation Army in South-west Institute of Technical Physics, Chengdu Sichuan 610041, China;
2. School of Precision Instrument & Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A portable optical pumping source for terahertz radiator is developed in order to provide a military compact solid-state terahertz radiator used in field environment, for the remote sensing for biological early warning detection system, optical electrical countermeasure, photoelectric imaging detection and high-speed communication in the terahertz waveband. Making use of the diode pumped Nd:YAG solid state laser without Thermo Electric Cooler(TEC) temperature control, the laser output energy of 150 mJ, the minimum pulse width of 6 ns, the largest laser frequency 30 Hz, laser beam divergence about 1 mrad are obtained. For the THz wave Parametric Oscillator(TPO)-THz by this pumping source, the 1.63 THz wave with single pulse energy 2.98 μ J is achieved, and the THz wave energy conversion efficiency is 1.92×10^{-5} .

Keywords: portable; optical pumping; terahertz radiator

太赫兹(THz)辐射是频率位于0.1~10 THz(1 THz= 10^{12} Hz)范围的电磁波。由于太赫兹辐射自身所具有的独特性质,它在军事、航空、反恐、检测毒剂等诸多领域显示出它的优势。太赫兹波对战场烟雾、沙尘、化学毒剂、地雷的探测,以及在反恐缉毒、安检领域^[1-3],一般是现场周边使用,对便携式太赫兹辐射源需求迫切。所以,小型便携式高峰值功率THz源是THz技术当前应用发展的瓶颈。目前,国际上产生THz波的方法一般是采用飞秒激光泵浦光电导天线或特种晶体(如ZnTe)间接产生,以及自由电子激光器、真空电子器件直接产生,另外,基于射频激励的连续或准连续稳频CO₂激光激发的光泵浦太赫兹辐射器^[4],其太赫兹波输出的平均功率虽然较高,但这几种方法都价格昂贵,体积庞大,不适合于野外军事应用。采用固态电子学方法,如耿氏二极管或量子级联激光器的方法,一般输出功率都较小,而用非线性光学参量振荡器(Optical Parametric Oscillator, OPO)产生全固态THz辐射不失为一种简便有效的方法,该方法小型便携,输出峰值功率大,效率高,阈值低,可在室温环境下操作,结合小型全固态泵浦源系统,可做成适合于野外军事应用的便携式高峰值功率军用太赫兹辐射器。

美国Edwards等2006年报道了用光泵非共线OPO来产生THz波,并取得了较大的突破和良好的预期。日本Riken光动力学中心的研究人员,用1.064 μ m的Nd:YAG激光泵浦掺氧化镁的铌酸锂,获得高功率太赫兹波输出。日本科学家T. Tanabe等利用Nd:YAG激光器(输出波长为1 064 nm)和该激光器三倍频输出,抽运偏硼酸钡(β -BaB₂O₄, BBO)晶体光学参量振荡器,其输出分别作为抽运源和信号光,采用GaP晶体作为差频晶体,利用非共线相位匹配配置,通过改变两入射光的夹角,实现了0.5~3 THz的太赫兹波调谐输出,并在1.3 THz处达到

收稿日期: 2016-09-22; 修回日期: 2017-02-27

480 mW 的峰值功率输出。

国内西南技术物理所与天津大学激光与光电子研究所合作,早在 20 世纪 90 年代初就开展了用于全固态 OPO 可调谐激光器铌酸锂的研究,目前在光泵浦太赫兹辐射器方面,用纳秒固体 YAG 激光泵浦,获得在 1.63 THz 处产生的 THz 波的单脉冲能量为 2.98 μJ , 对应的 THz 波能量转换效率为 1.92×10^{-5} 。

1 原理及实验装置

1.1 泵浦源的小型化

为在太赫兹波段的军用遥感生物探测预警雷达系统、光电对抗、成像探测以及高速通信提供全固态便携式紧凑太赫兹源,研制了一种小型便携式高峰值功率太赫兹辐射器的光泵浦源^[5],其光路原理图如图 1 所示。图中,1—输出镜、2—全反射镜、3—双光楔、4—1/4 波片、5—RTP 电光调 Q 晶体、6—偏振片、7—晶体座、8—激光工作介质 YAG 板条晶体、9—四面体三棱镜、10—x-y 柱面镜、11—二极管激光阵列抽运源。

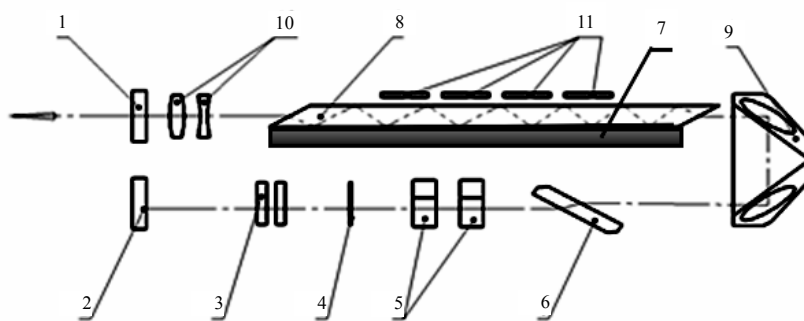


Fig.1 Laser cavity diagram of optical pump source for terahertz radiator

图 1 太赫兹辐射器的光泵浦源光路图

该激光器采用四面体三棱镜进行 1 800 光路折叠,主要由激光工作介质板条、二极管激光阵列抽运源和相应的其他激光谐振腔光学元件组成,激光谐振腔的输出镜和全反射镜位于其谐振腔的同一个侧面,即安装在一钛合金金属框体的同一端面上,此时,若结构件有高温或冲击振动导致的形变,则输出镜、全反镜两者同时同方向变化,对激光谐振腔镜的相对变化影响较小,同时在该钛合金框体的另一端采用三面相互垂直的四面体三棱镜作为 1 800 光路折叠镜,利用其入射光线始终与出射光线平行的原理,保证激光谐振腔的稳定可靠^[6-9]。这种结构使得该激光器能够在 $-40^{\circ}\text{C} \sim +65^{\circ}\text{C}$ 的高低温以及冲击、振动环境下可靠地工作。由于激光器采用这种 1 800 折叠光路,保证小型化的同时,可有较长的等效光路长度,并优化设计光学谐振腔。谐振腔的输出镜采用了变反射率的高斯镜,谐振腔采用了非稳腔,以得到较小的激光束散角。本研究获得最小光束束散角(全角)约 1 mrad,光斑直径 5 mm。

激光工作介质采用端面为布氏角的 Nd:YAG 板条晶体,处于一个凹形热传导冷却槽中,激光光路在板条内是 zigzag 形式,保证了板条晶体内激光增益的均匀性。二极管激光阵列抽运源是本设计的重点,是该激光器无 TEC 恒温的关键性元件,它能够在宽温度范围 $25^{\circ}\text{C} \sim 55^{\circ}\text{C}$ 环境下,高效率地发射脉宽 200 μs 、波长 808 nm 的抽运光,这是 Nd:YAG 激光介质的有效吸收波长,偏离该波长将导致二极管泵浦激光器(Diode Pumped Laser, DPL)效率大幅度降低,而不能使用。由于采用这种特殊的抽运源,以及与高效陶瓷加热片、高速冷却风机的有效结合,使得这种小型 Nd:YAG 重频固体激光器能够在 $-40^{\circ}\text{C} \sim +55^{\circ}\text{C}$ 环境下,无 TEC 恒温、以 20~30 Hz 脉冲重复频率稳定可靠地工作,激光输出能量 100~150 mJ。

设计了光泵浦源的一体化小型便携式系统,如图 2 所示。对泵浦源的 DPL 及其风冷部件、光束整形部件、电源系统以及控制部件进行了一体化设计,其中,专门为泵浦 THz 设计的光束整形部件,进一步将激光束整形为近高斯的平顶光束,光束整形部件内有扩束聚焦系统,可根据 THz 泵浦的需要调整输出光斑的大小、形状。

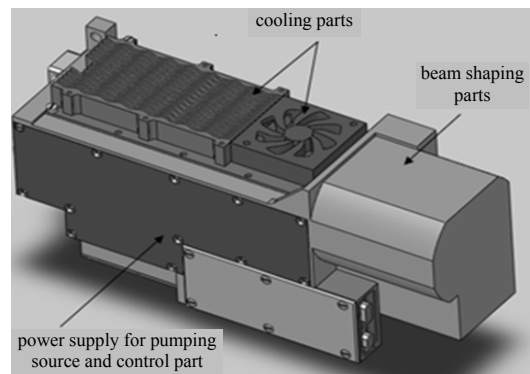


Fig.2 Unity system of pump source

图 2 泵浦源一体化系统

考虑到整机便携式的要求:整机功耗要求低,且适合于野外军用环境,如高低温 $-40^{\circ}\text{C}\sim+55^{\circ}\text{C}$ 工作环境,改进了激光器的二极管抽运源温控系统,由于一般的DPL,尤其是在高低温环境下都要求TEC对激光器的二极管抽运源进行温度控制,但是,通常的TEC制冷效率较低,功耗大,特别在高温环境下,TEC的散热变差,制冷效率急剧降低,带来TEC的温控失效,导致激光器失效甚至损坏,这就需要增大TEC的散热体积和散热风机功率,但整机小型化要求和低功耗要求又不允许这样,因此,采用无TEC的DPL技术,选用特种设计的二极管抽运板条,使得DPL整机能够工作在 $-40^{\circ}\text{C}\sim+55^{\circ}\text{C}$ 的环境下,同时满足低功耗、小型化的要求。

1.2 TPO-THz 实验原理

采用上述激光泵浦源系统,进行了表面垂直输出的外腔TPO-THz实验,实验原理如图3所示。凸透镜(convex)与凹透镜(concave)组成望远镜系统,将泵浦光的直径压缩为4 mm。 M_1, M_2 为镀1 064 nm高反膜的平面镜,用于折射泵浦光。Stokes光的谐振腔由平面镜 M_3 与 M_4 组成,两者均一半镀1 067~1 076 nm高反膜与1 064 nm高透膜,另一半未镀膜,泵浦光从腔镜未镀膜的一侧经过,腔内只有Stokes光振荡。Stokes光的谐振腔腔长为170 mm。非线性晶体 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 的掺杂浓度为5% mol,切割形状如图4(a)所示。整个谐振腔放置在一个旋转平台上,旋转平台通过精密步进电机控制。通过旋转平台就可以改变泵浦光与Stokes光的夹角,即相位匹配角,如图4(b)所示,从而可以调谐THz波的输出频率。

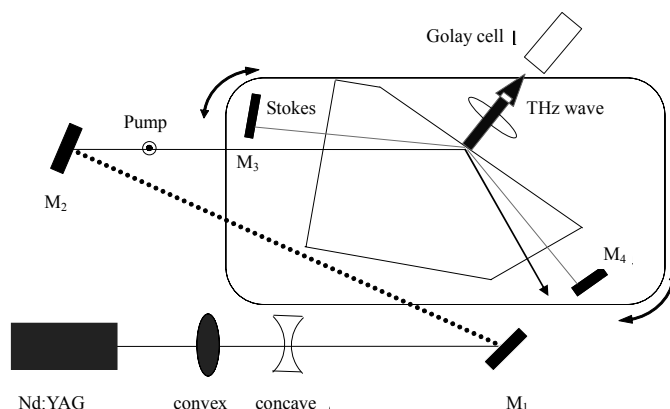


Fig.3 Experimental principle diagram of external cavity TPO-THz with the surface vertical output
图3 表面垂直输出的外腔TPO-THz的实验原理图

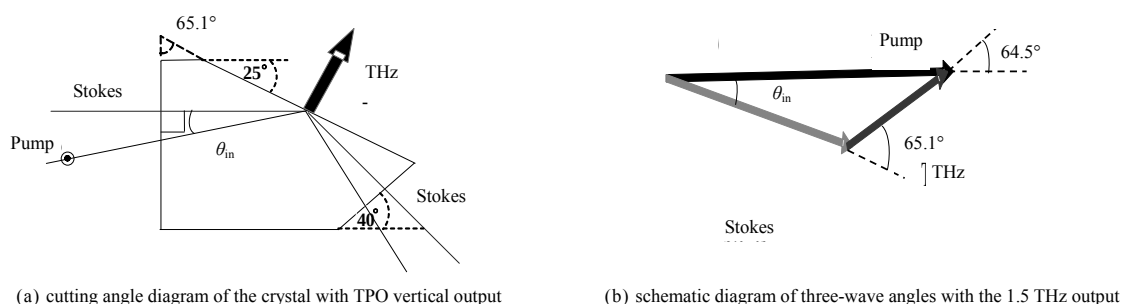


Fig.4 The diagram of the crystal and the wave vectors for TPO-THz principle experiment
图4 TPO-THz 原理实验中的晶体及波矢图

2 实验结果

进行了小型便携式太赫兹辐射器的光泵浦源实验及TPO-THz实验。

2.1 泵浦源激光能量测试

采用美国Coherent公司EPM2000型激光能量计测试激光器输出能量,按照工作1 min间隔15 s的工作模式,连续3个循环,常温下1个周期的激光输出平均能量150 mJ,能量稳定度 $\pm 8\%$ 。

2.2 泵浦源激光脉宽测试

采用美国TEK公司500 MHz宽带示波器和带宽大于1 GHz的P6703B型光电探头测试,激光脉宽约6~7 ns,测试激光波形如图5所示。

2.3 泵浦源激光远场光斑及发散角测试

激光器输出的激光束,通过焦距3 m的聚焦镜,在焦点处测试远场激光光斑形状(如图6所示)及尺寸,得到远场激光发散角约1 mrad。

2.4 TPO-THz 实验

用该泵浦源进行了TPO-THz实验,实验中用到的THz波探测器为俄罗斯TYDEX公司生产的Golay cell探测器,型号为GC-1T。测量时将Golay cell探测器连接到一个模拟示波器上,得到THz波的电压值,Golay cell的定标为137.1 kV/W,通过测量输出电压可得到THz输出功率。THz波输出频率为1.63 THz时,TPO的阈值约为73 mJ,THz波在阈值附近功率缓慢增加。随着泵浦能量的增加,THz波输出能量迅速增大,当泵浦光能量达到150 mJ时,产生的THz波的单脉冲能量为2.98 μ J,对应的THz波能量转换效率为 1.92×10^{-5} 。

由于在外腔泵浦结构中泵浦光只是一次性通过晶体,绝大部分能量会从M₄镜出射而未得到有效利用,下一步将通过泵浦光的循环利用,进一步提高THz波的有效转换效率,THz辐射器的小型工程化实验也将在下一步工作中开展,其中涉及到一系列的工程化可靠性设计及相关试验。

3 结论

进行了小型便携式太赫兹辐射器的光泵浦源实验,在用车载28 V蓄电池供电、功耗不到100 W情况下,获得激光输出能量150 mJ,脉冲宽度最小6 ns,激光重频最大30 Hz,激光束散角最小约1 mrad,该激光器质量为4~5 kg,能在-40℃~+55℃的温度适应范围正常工作。实验结果表明,该THz光泵浦源可适用于军用小型便携式THz辐射器的泵浦,用这样的泵浦源进行光泵浦TPO-THz,产生的1.63 THz波的单脉冲能量为2.98 μ J,对应的THz波能量转换效率为 1.92×10^{-5} 。

参考文献:

- [1] WOOLARD D J, BROWN E R, SAMUELS A C, et al. Terahertz frequency remote-sensing of biological warfare agents[J]. International Microwave Symposium Digest, 2003, 2(2): 763-766.
- [2] 冯华, 李飞, 陈图南. 太赫兹波生物医学研究的现状与未来[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(6): 827-835. (FENG Hua, LI Fei, CHEN Tunan. Current situation and future trends for THz-biomedicine[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(6): 827-835.)
- [3] 刘丰, 朱忠博, 崔万照, 等. 太赫兹技术在空间领域应用的探讨[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(6): 857-866. (LIU Feng, ZHU Zhongbo, CUI Wanzhao, et al. Application of terahertz techniques in space science[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(6): 857-866.)
- [4] 赵刚, 彭绪金, 杨闯, 等. CO₂激光差频产生THz波的理论计算及分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016, 14(2): 163-166. (ZHAO Gang, PENG Xujin, YANG Chuang, et al. Computation and analysis of terahertz wave difference frequency based on CO₂ laser[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016, 14(2): 163-166.)
- [5] 赵刚, 李晶, 彭绪金, 等. 无热电恒温的小型重频二极管抽运板条激光器[J]. 激光技术, 2016, 40(5): 625-628. (ZHAO Gang, LI Jing, PENG Xujin, et al. Compact repetitive diode-pumped slab lasers without thermoelectric coolers[J]. Laser

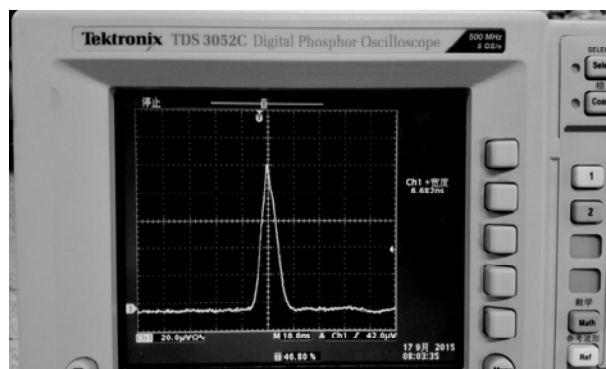


Fig.5 Display of the laser pulse width
图5 激光输出脉宽测试图



Fig.6 Display of the far-field laser spot
图6 激光远场光斑测试图

Technology, 2016,40(5):625-628.)

- [6] WU Yu, LONG Xiaoli, JIAO Zhongxin, et al. Optimal design of high power Nd:YAG laser based on compensation of thermal lens effect[J]. Laser Technology, 2015,39(3):377-380.
- [7] COYLE D B, STYSLEY P R. The High Output Maximum Efficiency Resonator(HOMER) developed for long life[C]// 2006 IEEE Aerospace Conference. Big sky, MT, USA: IEEE, 2006.
- [8] COYLE D B, KAY R B, STYSLEY P R, et al. Efficient reliability, long-life, diode-pumped Nd:YAG laser for space-based vegetation topographical altimetry[J]. Applied Optics, 2004,43(27):5236-5242.
- [9] COYLE D B, KAY R B, STYSLEY P R, et al. A diode pumped, Nd:YAG, Q-switched unstable resonator developed for multi-billion shot, spaced based remote sensing applications[C]// 2005 Quantum Electronics and Laser Science Conference. Baltimore, MD, USA: IEEE, 2005:850-852.

作者简介:



刘 兵(1968-), 男, 重庆市人, 高级工程师, 从事军用激光光学方面的研究、军用激光设备监测等方面的工作.email:229817210@qq.com.

赵 刚(1962-), 男, 成都市人, 研究员, 主要从事军用激光与光电子技术产品及装备的研究与批量生产.

彭续金(1968-), 男, 湖北省潜江市人, 研究员, 主要从事军用激光电子学方面的研究.

刘亚萍(1982-), 女, 四川省西昌市人, 高级工程师, 主要从事光电机械结构研究.

徐文韬(1991-), 男, 重庆市人, 硕士, 主要从事光电子与光子学技术研究.