

文章编号: 2095-4980(2015)03-0361-04

高输出功率锥形波导太赫兹量子级联激光器

王 涛, 刘俊岐, 刘峰奇

(中国科学院半导体研究所 半导体材料科学重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 制作了基于锥形波导结构的高输出功率的太赫兹(THz)量子级联激光器。激光器采用单面金属波导结构, 并采用锥形波导形状提高光输出功率, 且保证了良好的光斑远场发散角。激光器水平方向远场光斑发散角为 18.4° , 器件输出中心波长为 $93\ \mu\text{m}$ (3.23 THz), 器件最高输出功率达到了 185 mW, 最高工作温度为 95 K。80 K 时, 器件的最高脉冲输出功率能达到 65 mW。基于如此高的输出功率, 制作了液氮杜瓦封装的小型便携式太赫兹激光源。

关键词: 量子级联激光器; 太赫兹; 高功率

中图分类号: TN24

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201503.0361

High output power tapered terahertz quantum cascade laser

WANG Tao, LIU Junqi, LIU Fengqi

(Key Laboratory of Semiconductor Materials Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: High output power terahertz(THz) quantum cascade laser based on tapered waveguide profile is fabricated. Semi-insulating surface-plasma waveguide structure and tapered profile are adopted to enable high output power and excellent far-field lobe profile. The Full Width at Half Maximum(FWHM) of the laser beam in the horizontal direction is 18.4° . The emission wavelength is centered at $93\ \mu\text{m}$ (3.23 THz), the highest output power is 185 mW and the highest operation temperature is 95 K. The output power at 80 K is 65 mW. Based on the high output property, portable terahertz laser source is packaged by liquid nitrogen dewar.

Key words: quantum cascade laser; terahertz; high output power

太赫兹(terahertz, THz)量子级联激光器^[1]自从 2002 年被发明以来就一直受到广泛关注。它作为一种紧凑、相干的固态光源, 具有很大的潜在应用价值, 这些应用包括: 安检和有毒物质检测、天体物理学和大气科学、高分辨光谱、生物学和医学、自由空间光通信等^[2-4]。在这些实际应用中, 人们希望光源具有较高的光输出功率和较好的远场光斑发散角。器件的输出光功率可以通过设计长腔长和宽脊宽的器件构型实现, 但是长的腔长对封装工艺的要求非常严苛, 不易烧结。宽脊宽器件虽然能提高光输出功率, 但是由于器件脊宽的增加, 输出的远场光斑一般会出现高阶横模^[5], 而高阶横模的出现不利于应用中光斑与其他部件的耦合。为了在提高器件输出功率的同时保证器件具有良好的远场特性, 本文采用基于单面金属波导的锥形器件结构^[6]。该结构由后端较窄的脊型区和前端较大面积的锥形放大区构成。较窄的脊型区对高阶横模有较大的损耗, 能有效滤掉高阶横模, 保证激光器的基横模输出。前端的锥形区域具有较大的增益材料面积, 能为光输出提供较大的光增益, 实现高的光输出功率。基于这种结构, 实现了最大功率为 185 mW 的脉冲光输出, 并且保证了基横模的远场光斑, 光斑远场发散角仅为 18.4° 。

1 器件制作

激光器外延片的生长采用 Veeco Gen II 固态分子束外延设备, 材料外延生长于半绝缘 GaAs 的(001)面上。外延材料生长结构如图 1 所示。有源区采用的是束缚态到连续态跃迁模式, 详细结构见文献[7]。为了提高器件的光输出功率, 采用单面金属波导, 即半绝缘等离子体波导进行器件有源区光场的限制^[8]。本文设计的锥形激光器

收稿日期: 2014-10-29; 修回日期: 2014-12-05

基金项目: 国家“973 计划”资助项目(2014CB339803, 2013CB632801); 中国工程物理研究院太赫兹科学技术基金资助项目(CAEP THZ201303)

的锥形角 θ 为 4° ，直条波导区脊宽为 $200\ \mu\text{m}$ ，长度为 $0.5\ \text{mm}$ ，器件总腔长为 $2.5\ \text{mm}$ 。锥形器件构型通过采用传统的接触光刻和湿法腐蚀制作，湿法腐蚀采用的腐蚀液为 $\text{H}_3\text{PO}_4/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ 。随后采用电子束蒸发设备在器件脊形两边和下接触层选择区域蒸镀上 $\text{Ge}/\text{Au}/\text{Ni}/\text{Au}$ 层，并在氮气环境下退火，实现欧姆接触。在整个脊上和下接触层有欧姆接触的地方蒸镀上 Ti/Au 。这层金属起到对光场的限制和方便器件后续引线的作用。衬底被减薄至 $200\ \mu\text{m}$ 并抛光。为了方便器件与热沉的烧结，采用热蒸发设备在衬底面蒸镀上 Ti/Au 层。制作好的器件结构如图 2 所示。为了提高单面输出功率，在器件后腔面镀上高反膜。最后器件被解理成所需长度并采用 In 焊料烧结在 Cu 热沉上，用金丝连接好接线，为测试做准备。

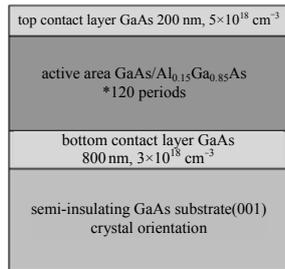


Fig.1 Epitaxy structure of terahertz quantum cascade laser
图 1 太赫兹量子级联激光器外延材料结构图

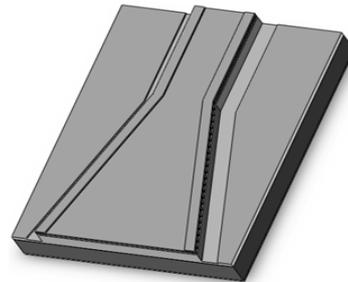


Fig.2 Schematic of tapered waveguide
图 2 锥形波导构型的太赫兹量子级联激光器示意图

2 测试及讨论

2.1 光谱测试

本文首先对器件的光谱输出特性进行测量。用螺丝将烧结于铜热沉上的激光器固定在液氦低温杜瓦的冷头上，并将温度降到 $10\ \text{K}$ 。激光器的驱动电源采用 PCX 7420 脉冲电流源，采用的测试电流为 $1\ \mu\text{s}$ 脉宽，8%占空比的脉冲电流。进行光谱测量时，激光器发出的光经过 2 个离轴抛物面镜传送到傅里叶变换光谱仪，最终聚焦到工作于室温的 DTGS 探测器上。受限于光谱仪的性能，光谱测量是在步进模式下进行的，测量所采用的分辨率为 $0.5\ \text{cm}^{-1}$ ，所测量的光谱如图 3 所示。从图中可以看到法布里-珀罗(F-P)腔多纵模模式，激光器中心激光波长 $\sim 93\ \mu\text{m}$ ($3.23\ \text{THz}$)。

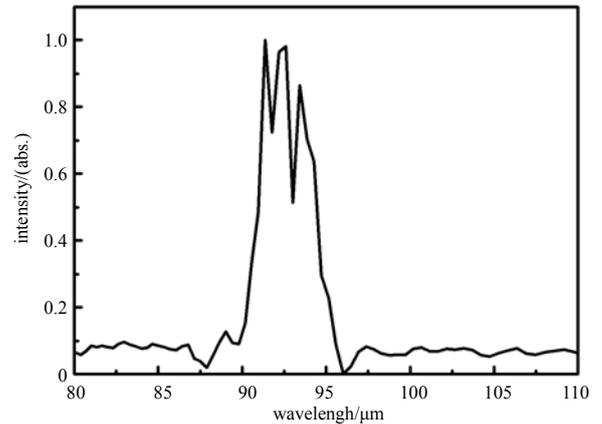
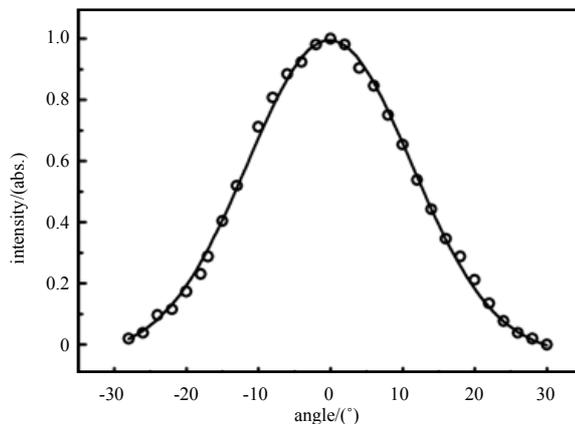
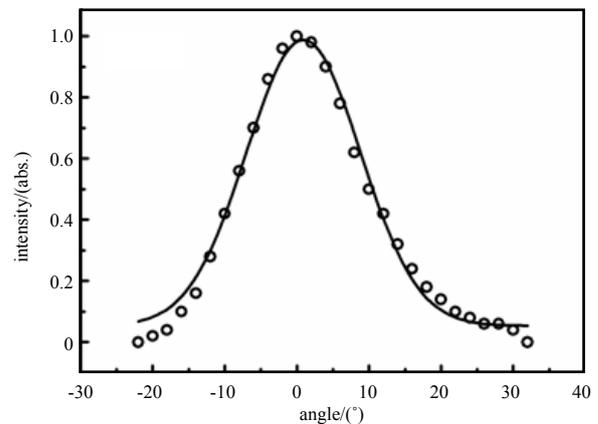


Fig.3 Spectrum measured from a F-P cavity laser. The driving pulse width is $2\ \mu\text{s}$ and the duty cycle is 8%.
图 3 $10\ \text{K}$ 时所测的量子级联激光器的激光光谱。驱动电流为 $1\ \mu\text{s}$ 脉宽，8%占空比的脉冲电流。



(a) straight laser with ridge width $200\ \mu\text{m}$



(b) tapered laser

Fig.4 The far-field distribution of THz lasers

图 4 激光器的远场光强分布，圆圈为测量结果，实线是对这些结果的高斯拟合

2.2 远场测试

通过对激光器的远场输出光强度进行角度扫描获得远场输出性能。探测器采用的是经过校准的热堆探测器 (OPHIR, Model 3A-NOVA II)，采用手动方式扫描，扫描精确度为 2° 。为了对比，一并测量了脊宽为 $200\ \mu\text{m}$ 无锥

角的直条激光器和锥形结构激光器。图4为测得的结果,图中圈为测试结果,线为对结果的高斯拟合。图4(a)为脊宽 $200\ \mu\text{m}$ 的无锥角直条激光器远场强度分布图,通过高斯拟合可以得到激光器的远场发散角的半高宽为 26.8° 。图4(b)为锥形激光器的远场强度分布。高斯拟合得到的远场发散角的半高宽为 18.6° 。由于锥形激光器具有更大的激光出射面,从而能有效降低远场发散角,因此锥形激光器比直条激光器具有更低的远场发散角。而锥形结构中较窄的脊型区能起到对高阶横模的过滤作用,所以得到的远场强度分布仍然是基横模分布。

2.3 功率测试

为了表征激光器的功率输出性能,对激光器的 $P-I-U$ 特性也进行了测量,并将结果示于图5中。在进行功率测量时,在激光器的出光面放置一个规格为 $f/2.0$ 的温斯顿锥以便于输出功率的收集。输出功率的收集采用的是TK THz绝对功率计系统,所测量的数据都经过了液氮杜瓦聚乙烯窗口片透过率的校准。为了获得较高的光输出功率,采用小的测量脉宽以减小器件生热。测量脉宽采用 $1\ \mu\text{s}$,脉冲周期为 0.5% 。由图可以看出,激光器在 $10\ \text{K}$ 时的最高光输出功率达到 $185\ \text{mW}$,最高工作温度为 $98\ \text{K}$ 。值得注意的是,激光器在 $80\ \text{K}$ 时依然有 $65\ \text{mW}$ 的输出功率,因此将激光器封装于小型液氮杜瓦中,制作了便携式的太赫兹激光源,见图6。为了体现锥形结构对输出功率的放大作用,也测量了 $200\ \mu\text{m}$ 直条激光器的功率输出性能。图5插图示意出了2种激光器在 $10\ \text{K}$ 时的功率曲线对比。普通直条激光器此时的输出功率为 $141\ \text{mW}$,远低于锥形激光器的输出功率,锥形结构对输出功率的放大作用明显。

3 结论

本文制作了激光中心波长 $\sim 93\ \mu\text{m}$ ($3.23\ \text{THz}$)的太赫兹量子级联激光器。为了提高太赫兹量子级联激光器的实际应用性能,采用器件的锥形结构来同时降低远场光斑发散角和提高光输出功率。器件的远场光斑发散角从直条激光器的 26.8° 降到了 18.6° ,并且保持了高斯基横模模式。光输出功率从直条激光器的 $141\ \text{mW}$ 提升到 $185\ \text{mW}$,功率提高明显。在 $80\ \text{K}$ 时依然有 $65\ \text{mW}$ 的功率输出。基于这种良好的输出性能,制备了液氮杜瓦封装的便携式太赫兹激光源。

参考文献:

- [1] Köhler R, Tredicucci A, Beltram F, et al. Terahertz semiconductor-heterostructure laser[J]. Nature, 2002, 417(6885): 156-159.
- [2] Mittleman D M. Imaging and sensing with terahertz radiation[J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 2005, 760(1): 25-32.
- [3] Hübers H W, Eichholz R, Pavlov S G, et al. High resolution terahertz spectroscopy with quantum cascade lasers[J]. Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 2013, 34(5-6): 325-341.
- [4] Grant P D, Laframboise S R, Dudek R, et al. Terahertz free space communications demonstration with quantum cascade laser and quantum well photodetector[J]. Electronics Letters, 2009, 45(18): 952-954.
- [5] Chi M, Bøgh N, Thestrup B, et al. Improvement of the beam quality of a broad-area diode laser using double feedback from

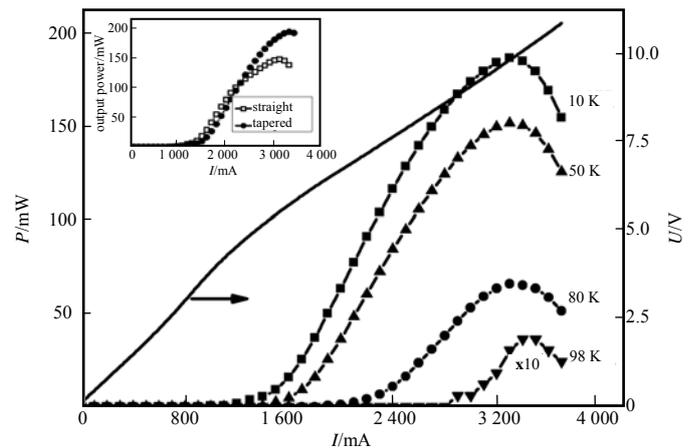


Fig.5 The $P-I-U$ curves of tapered lasers measured at $10\ \text{K}$. Inset: the output power comparison between tapered laser and straight laser
图5 锥形太赫兹量子级联激光器的电流-功率-电压($P-I-U$)曲线,器件的电压曲线是在 $10\ \text{K}$ 时测得。插图为锥形激光器和 $200\ \mu\text{m}$ 宽直条激光器在 $10\ \text{K}$ 时功率输出曲线对比。

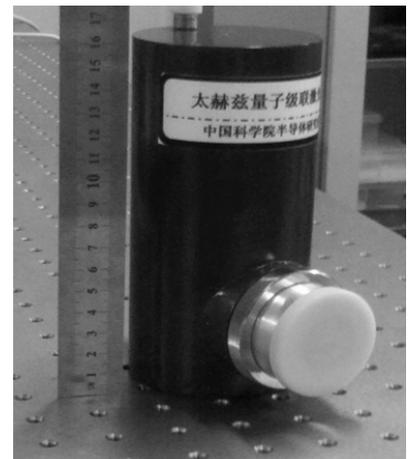


Fig.6 Portable terahertz source packaged by liquid dewar
图6 液氮杜瓦封装的便携式太赫兹量子级联激光器

two external mirrors[J]. Applied Physics Letters, 2004,85(7):1107-1109.

- [6] Nahle L, Semmel J, Kaiser W, et al. Tapered quantum cascade lasers[J]. Applied Physics Letters, 2007,91(18):181122-181122-3.
- [7] LIU J Q, CHEN J Y, LIU F Q, et al. Terahertz quantum cascade laser operating at 2.94 THz[J]. Chinese Physics Letters, 2010,27(10):107-109.
- [8] Williams B S. Terahertz quantum cascade lasers[J]. Nature Photonics, 2007,1(9):517-525.

作者简介:



王涛(1987-), 男, 四川省雅安市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为MBE及半导体太赫兹量子级联激光器 .email:wangtaoysu@semi.ac.cn.

刘俊岐(1976-), 男, 北京市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为中远红外半导体量子器件.

刘峰奇(1963-), 男, 北京市人, 研究员, 主要研究方向为半导体红外量子材料和器件.

(上接第360页)

- [10] Karashima K, Shiraishi M, Hinata K. Heterodyne detection of output of sub-THz RTD oscillator using InP-SBD detector and RTD local oscillator[C]// 35th International Conference on Infrared Millimeter and Terahertz Waves(IRMMW-THz). Rome:[s.n.], 2010:1-2.
- [11] Tadao N. Terahertz communications technologies based on photonic and electronic approaches[C]// 18th European Wireless Conference. Poznan, Poland:[s.n.], 2012:
- [12] Ishibashi T, Fushimi H, Ito H, et al. High power uni-traveling-carrier photodiodes[C]// International Topical Meeting on Microwave Photonics. Melbourne, Australia:[s.n.], 1999(1):75-78
- [13] 夏力臣. InP/InGaAs 单行载流子光电二极管的研究[D]. 成都:电子科技大学, 2005. (XIA Lichen. The study of InP/InGaAs uni-traveling-carrier photodiodes[D]. Chengdu, China:University of Electronic Science and Technology of China, 2005.)
- [14] Nagatsuma T, Song Ho-Jin, Fujimoto Y, et al. Giga-bit wireless link using 300-400 GHz bands[C]// IEEE International Topical Meeting on Microwave photonics. Valencia, Spain:[s.n.], 2009:1-4.
- [15] Ito H, Furuta T, Nakajima F. Photonic generation of continuous THz wave using uni-traveling-carrier photodiode[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005,23(12):4016-4021.

作者简介:



宋瑞良(1980-), 男, 天津市人, 高级工程师, 主要从事毫米波/太赫兹射频系统及器件研究 .email:songruiliang@hotmail.com.

宋跃(1982-), 男, 北京市人, 高级工程师, 主要从事毫米波及太赫兹微带天线设计.