

文章编号: 2095-4980(2015)02-0195-03

单模太赫兹量子级联激光器

刘俊岐, 王 涛, 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: 为了获得窄线宽太赫兹光源, 制作了基于表面金属光栅的单模太赫兹量子级联激光器。通过优化光栅结构, 获得了具有较强耦合效率和较低损耗的光栅结构参数。波导结构采用半绝缘表面等离子体波导以便能获得较高的光输出功率。激光器单模激光波长为 95 μm 。10 K 时, 器件最高单模输出功率达到了 43 mW, 单模抑制比为 18 dB。单模器件工作温度超过 70 K, 在 70 K 时, 仍然有 5 mW 的单模输出功率。这种输出性能良好的激光器有望作为太赫兹接收机的本振源。

关键词: 太赫兹; 量子级联激光器; 单模; 本振源

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201502.0195

Single-mode terahertz quantum cascade laser

LIU Junqi, WANG Tao, LIU Fengqi

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

Abstract: A single-mode terahertz quantum cascade laser with metallic surface gratings is fabricated in order to obtain a terahertz source with narrow line width. Strong coupling efficiency and low waveguide loss are realized. A semi-insulating surface-plasmon waveguide is used to present a high output power. The lasing wavelength of this laser is 95 μm . The highest optical power of 43 mW and Side-Mode Suppression Ratio(SMSR) of 18 dB can be obtained under 10 K. Under the highest operation temperature of 70 K, an output power of 5 mW is still achieved. This kind of laser is the most promising solid-state source as the Local Oscillator(LO) for a high resolution terahertz heterodyne receiver.

Key words: terahertz; quantum cascade laser; single-mode; local oscillator

近年来, 新型太赫兹(THz)辐射源和探测机制的发展已经在微波与红外之间的“THz 空隙”电磁频段开辟了新的研究领域和应用领域^[1]。其中高分辨率光谱技术最具代表性^[2]。太空和大气中分子和原子本征吸收和发射谱线多数存在于 THz 频率范围, 因此, 基于分子旋转谱线和原子(或离子)精细结构谱线探测的高分辨率外差光谱技术是探索星际物质以及行星(包括地球)大气的强有力工具。例如, CII 精细结构线为 1.6 THz, OH 旋转跃迁线为 1.8 THz, 2.5 THz, 3.5 THz, OI 精细结构线为 4.7 THz 等。其中, OH 根是大气中的主要氧化剂, 涉及到大气污染、臭氧耗尽以及温室效应。利用携带高分辨率的外差接收设备的空间平台, 人们可以得到所观察目标的温度、密度、分布以及动态过程等有价值的信息。除此之外, 外差光谱探测技术在安全领域的应用也具有重要意义, 例如隐藏武器的远距离探测。外差接收机的关键部件是混频器和本振源^[3]。探测频率小于 2 THz 时, 通常采用倍频的微波源作本振源, 但随着频率的提高, 输出功率大大降低, 因而不能满足需求。光学泵浦的气体激光器能够工作在更高的频率, 但其体积笨重且不能进行频率调谐。随着科学技术的发展和空间观测任务的深入, 人们要求 THz 外差接收机具有更高角分辨率、更高灵敏度和更高接收频率(2 THz~6 THz)。因此对新型固态 THz 本振源的研究提出了巨大挑战。基于量子级联结构的 THz 半导体激光器具有结构紧凑和高功率效率的特点, 成为目前理想的 THz 本振源^[4]。作为本振源应用, 要求 THz 量子级联激光器(Quantum Cascade Laser, QCL)^[5-6]具备单一的空间模式、稳定的输出功率以及激光频率位于目标谱线附近(约几 GHz)。为了获得理想的 THz 本振源, THz 量子级联激光器单模化至关重要。

收稿日期: 2014-10-29; 修回日期: 2014-12-09

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2014CB339803); 国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(2011YQ13001802-04; 中国工程物理研究院太赫兹科学技术基金资助项目(CAEP THZ201303)

1 器件制作

为了制备单模输出的太赫兹量子级联激光器, 首先进行了材料的外延。所采用的衬底材料为半绝缘 GaAs, 生长面为(001)面。材料生长步骤为: a) 生长掺杂浓度为 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 800 nm 厚的下 GaAs 接触层; b) 在下接触层上生长厚度约 14 μm 的有源区 GaAs/AlGaAs 超晶格结构^[7]; c) 在有源层上生长厚度为 200 nm, 掺杂浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的上接触层。随后对生长好的外延材料进行器件工艺制作。为了提高激光器的输出功率, 波导结构采用半绝缘等离子体波导^[8]。采用接触光刻和湿法腐蚀的方法制作出激光器的脊型波导, 腐蚀深度为腐蚀到下接触层。随后采用电子束蒸发在波导的脊上和下接触层的选择区域蒸镀上 Ge/Au/Ni/Au, 并在 N_2 环境下 360° 退火 60 s, 形成电注入的欧姆接触。在整个脊上和下接触层的欧姆接触区都蒸镀上 Ti/Au, 一方面形成光限制层, 另一方面便于引线。

通过在脊型波导上制作表面金属分布反馈(Distributed Feed Back, DFB)光栅来达到器件单模输出的目的。由于本材料结构 F-P 腔器件激光波长分布于 93 μm 至 97 μm 之间, 为了使单模输出功率为最大, 设计的 DFB 光栅周期对应的中心波长为 95 μm 左右。通过模拟得出的材料有效折射率为 3.59。由此设计了光栅周期为 13.2 μm 的 DFB 光栅。由于太赫兹量子级联激光器的光场限制是依赖于表面金属形成的等离子体效应, 所以制作的光栅占空比不应太大, 高占空比的金属光栅会降低对光场的限制作用, 增加光损耗。这里选用的光栅占空比为 85%。对光栅耦合强度和光栅损耗相对于光栅刻蚀深度的关系进行了模拟, 模拟结果如图 1 所示。由图可见, 当光栅刻蚀深度没有超过上接触层的时候, 虽然光栅有较强的耦合强度, 但同时具有较大的光栅损耗。当光栅刻蚀深度超过了上接触 GaAs 层, 光栅具有相对较强的耦合系数, 同时具有较小的波导损耗。此时的耦合系数约为 20 cm^{-1} , 波导损耗约为 6.5 cm^{-1} 。光栅刻蚀深度继续加深, 耦合系数和波导损耗基本不变。这里选取的刻蚀深度为刻蚀过上接触层。为了保证刻蚀的深度能透过上接触层, 刻蚀时稍微延长一段刻蚀时间, 对有源区的第一个周期进行了部分刻蚀。

表面金属光栅是采用干法刻蚀设备直接在脊上的 Ti/Au 层制备出来的。干刻完成后再进行短暂的湿法腐蚀, 以消除干法刻蚀形成的光栅表面粗糙度。如图 2 所示, 图 2(a)为激光器脊上光栅形貌, 可以看出, 光栅结构非常均匀。图 2(b)为脊上光栅横截面示意图。

2 器件性能测试及分析

2.1 光谱测试

为了表征器件的单模特性, 对激光器的输出光谱进行了测量。所采用的设备为 Bruker 傅里叶变换光谱仪, 型号为 EQUINOX 55。激光器首先被固定在液氮杜瓦的冷头上, 随后进行杜瓦降温, 整个光谱测试是在杜瓦温度为 10 K 时进行的。进行光谱测量时, 激光器所加电流为接近激光器最高输出功率时的电流值。驱动电流源采用 PCI7420 脉冲电流源。驱动电流为脉宽 1 μs 、重复周期为 8% 的脉冲电流。由于光谱仪性能的限制, 测量在步进模式下进行, 测量的分辨率为 0.5 cm^{-1} 。器件的测量结果如图 3 所示。可以看出, 激光器工作于单纵模模式, 中心波长为 95 μm 。图 3 中插图对数坐标下的激光谱图, 可以看出激光光谱的边模抑制比为 18 dB。

2.2 功率测试

对激光器的功率输出性能进行了测量。为了提高探测器对出射光的收集效率, 在激光器前腔面放置上一个 f/2.0 的温斯顿锥。驱动电流脉宽为 1 μs , 重复频率为 5 kHz。输出功率收集采用 Thomas Keating (TK) THz 绝对

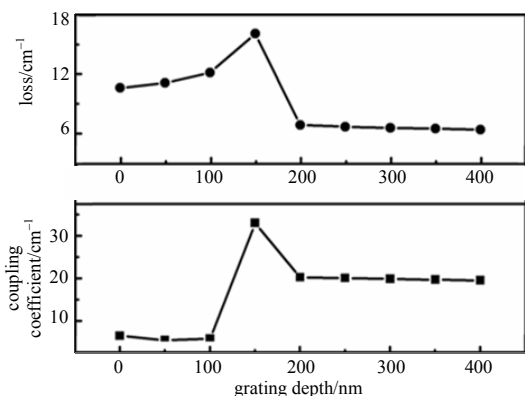


Fig.1 Waveguide losses and coupling coefficient κ varying with the grating etch depth for a constant grating period of 13.2 μm and duty cycle of 85%.

图 1 光栅刻蚀深度与耦合系数和波导损耗的关系曲线

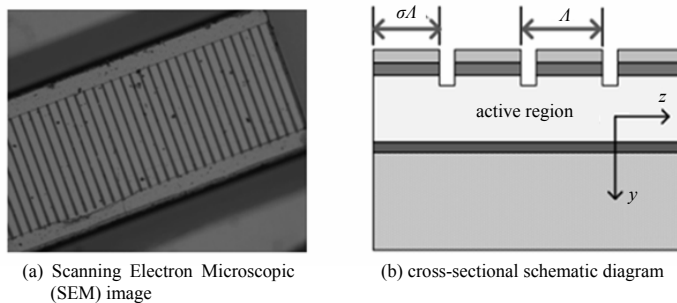


Fig.2 Schematic diagram of the metal-stripe surface grating

图 2 激光器光栅结构示意图: (a)光栅表面扫描显微镜图像, (b)光栅横截面示意图

功率计系统。收集到的功率经过了液氮杜瓦聚乙烯窗口透过率的修正。图 4 所示为测试结果。激光器在 10 K 时，最高单模输出功率为 43 mW。最高工作温度超过了 70 K，在 70 K 时，激光器仍然有 5 mW 的功率输出。图 4 中黑线所示为在 10 K 时所测激光器的电流电压曲线。

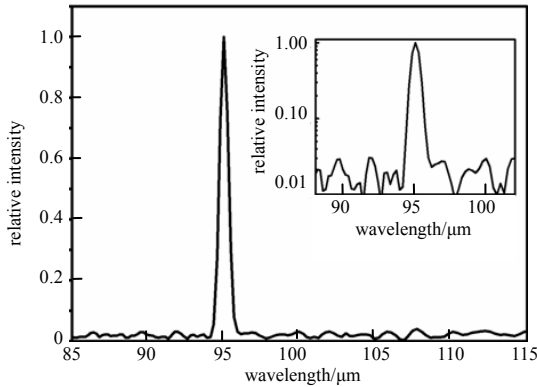


Fig.3 Lasing spectrum at 10 K (inset logarithmic scale of the spectrum)

图 3 激光器在 10 K 时的光谱测量图(插图为在对数坐标下的光谱图)

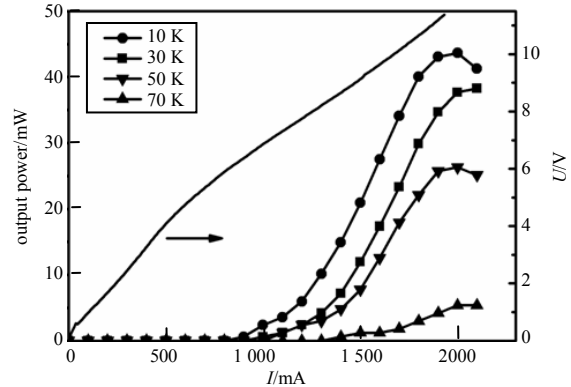


Fig.4 Light power versus current characteristics at various heat-sink temperatures and the voltage versus current at 10 K.

图 4 不同温度下激光器的输出功率曲线以及 10 K 时的电流电压曲线

3 结论

通过对光栅结构参数的优化，设计出具有较高耦合系数和较低光栅损耗的太赫兹表面金属光栅。通过在太赫兹量子级联激光器上制备这种光栅结构，获得了可作为太赫兹外差接收机本振源的高性能单模激光器。10 K 时，激光器最高输出功率达到了 43 mW，器件单模激光波长为 95 μm ，单模抑制比达到 18 dB。器件工作温度超过了 70 K，在 70 K 时仍然有 5 mW 的光输出功率。

参考文献：

- [1] Siegel P H. Terahertz technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002,50(3):910-928.
- [2] Ren Y,Hovenier J N,Higgins R,et al. Terahertz heterodyne spectrometer using a quantum cascade laser[J]. Applied Physics Letters, 2010,97(16):161105-1-161105-3.
- [3] Hübers H W. Terahertz heterodyne receivers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2008,14(2): 378-391.
- [4] Hubers H W. Experiences with quantum cascade lasers as local oscillator[C]// Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Space Terahertz Technology. Groningen,Netherlands:Netherlands Institute for Space Research, 2008:202-206.
- [5] 段素青,楚卫东,杨宁,等. 太赫兹量子级联激光器有源区增益分析和设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(1):16-20. (DUAN Suqing,CHU Weidong,YANG Ning,et al. Design of the active region gain of the terahertz quantum cascade lasers[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(1):16-20.
- [6] 谭智勇,曹俊诚. 太赫兹量子级联激光器及其光束表征技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(1):21-25. (TAN Zhiyong,CAO Juncheng. Terahertz Quantum-Cascade Laser and its beam pattern characterization[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(1):21-25.
- [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):104205-1-3.
- [8] Williams B S. Terahertz quantum cascade lasers[J]. Nature Photonics, 2007,1(9):517-525.

作者简介：



刘俊岐(1977-),男,河北省廊坊市人,博士,副研究员,主要研究方向为中远红外半导体量子器件.email:jqliu@semi.ac.cn.

王涛(1987-),男,四川省雅安市人,在读博士研究生,主要研究方向为分子束外延技术和太赫兹量子级联激光器。

刘峰奇(1963-),男,河南省郑州市人,博士,研究员,主要研究方向为红外量子材料、物理及器件。