

文章编号: 2095-4980(2016)05-0657-05

低阈值连续波工作的 2.9 THz 量子级联激光器

蒋涛^{1a,1b}, 湛治强^{1a,1b}, 沈昌乐^{1a,1b}, 杨宁^{1b,2}, 邓青华^{1a,1b}, 王雪敏^{1a,1b},
楚卫东^{1b,2}, 吴卫东^{1a,1b}, 段素青^{1b,2}, 唐永建^{1a}

(1.中国工程物理研究院 a.激光聚变研究中心 等离子体物理重点实验室, 四川 绵阳 621999;
b.微系统与太赫兹研究中心, 四川 成都 610200; 2.北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘要: 为了获得低阈值连续波工作太赫兹源, 采用固源分子束外延技术生长了 GaAs/AlGaAs 束缚态向连续态跃迁的太赫兹量子级联激光器(QCL)有源区, 基于半绝缘-等离子体波导工艺制作了太赫兹量子级联激光器。获得了激光器(腔面未镀高反射膜)的发射光谱和相应的输出特性等性能, 其中器件在 10 K 工作温度、350 mA 激励电流下的中心频率为 2.93 THz, 连续波工作模式的阈值电流密度为 156 A/cm², 器件的最大光输出功率为 7.84 mW, 最高工作温度为 62 K。

关键词: 太赫兹; 量子级联激光器; 连续波; 波导

中图分类号: TN23

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201605.0657

Fabrication of continuous-wave-work 2.9 THz quantum cascade laser with low threshold

JIANG Tao^{1a,1b}, ZHAN Zhiqiang^{1a,1b}, SHEN Changle^{1a,1b}, YANG Ning^{1b,2}, DENG Qinghua^{1a,1b},
WANG Xuemin^{1a,1b}, CHU Weidong^{1b,2}, WU Weidong^{1a,1b}, DUAN Suqing^{1b,2}, TANG Yongjian^{1a}

(1a.Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China; 1b.Microsystem and Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Chengdu Sichuan 610200, China; 2.Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

Abstract: In order to obtain low threshold and continuous-wave-work THz source, a terahertz Quantum Cascade Laser(QCL) based on bound-to-continuum intersubband transition is fabricated with semiconductor-plasma waveguide. Then the QCL properties are systematically studied. The lasing frequency is determined to be 2.93 THz and the device shows a Continuous Wave(CW) output power>7.8 mW, with a threshold current density 156 A/cm², lasing work temperature up to 62 K.

Key words: THz; Quantum Cascade Laser; continuous-wave; waveguide

太赫兹(THz)波是指频率从 0.1 THz~10 THz, 介于毫米波与红外光之间的电磁波, 具有安全性、宽带性、指纹谱特性和穿透性等特点, 在国家安全、航空航天、生物医学、材料科学等众多领域都有潜在的应用价值^[1]。THz 量子级联激光器(QCL)作为一种紧凑的、相干的固体连续太赫兹辐射源, 其频率可通过能带和波函数设计进行调控, 具有响应速度快、体积小、便于集成等优点。自从 2002 年 Köhler 等^[2]首次制备出量子级联激光器以来, THz QCL 的各项性能在全世界科技工作者的努力下取得了很大进展, 其工作温度和输出功率不断提高, 阈值电流密度不断降低, 同时其激励频率范围也被不断拓宽^[3-8]。尽管如此, 要真正实现 THz QCL 的应用特别是室温下使用还需要更进一步的工作。而相比于中红外 QCL, THz QCL 研制之所以更加困难是由于太赫兹波的光子能量低于极化光学声子能量, 要实现粒子数反转比中红外 QCL 更加困难。为了实现粒子数反转, 人们设计了不同的有源区结构, 包括啁啾超晶格结构^[2]、束缚态向连续态跃迁结构^[9-10]以及共振声子结构^[5,11]等。在这些结构中, 束缚态向连续态跃迁结构具有阈值电流小以及材料器件相对容易实现的优点, 而低阈值电流密度是实现低功耗和大功率输出的关键点。本文通过固源分子束外延技术生长了束缚态向连续态跃迁结构的 THz QCL 有源区材料, 采用半绝缘-等离子体波导结构工艺^[12]制作了 THz QCL 器件, 并且给出了器件的光电特性。

收稿日期: 2015-06-20; 修回日期: 2015-08-12

基金项目: 中国工程物理研究院重点实验室基金资助项目(9140C680106150C68295); 中国工程物理研究院发展基金资助项目(2015B0403095)

1 有源区能级结构的理论计算和器件制备

实验中 QCL 的激发区为束缚-连续态跃迁模式。图 1 是利用分区级数解法^[13]计算的子带结构和相应的波函数概率分布。图中红线为产生激射的上下辐射态的电子概率分布, 绿线为收集/注入态的电子概率分布。在 2.1 kV/cm 的设计偏压下, 收集/注入态与上辐射态接近共振, 此时两辐射态能差为 11.6 meV, 对应激射频率为 2.80 THz。计算得到的辐射态间电偶极矩阵元大小为 $z=6.68$ nm, 振子强度为 $f=0.904$, 较大的电偶极和振子强度保证了辐射态之间的辐射效率。

具体材料生长步骤为: 首先在(001)面半绝缘 GaAs 衬底材料上, 生长 700 nm 厚的重掺杂 GaAs 下接触层, 其 Si 掺杂浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; 其次在下接触层上生长 90 个周期的多量子阱结构, 此结构与 Barbieri 等^[10]的结构类似, 每个周期中从注入势垒层开始, 各层厚度依次为 **3.8/14.0/0.6/9.0/0.6/15.8/1.5/12.8/1.8/12.2/2.0/12.0/2.0/11.4/2.7/11.3/3.5/11.6** nm, 其中, 粗体表示 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ 势垒层, 普通字体表示 GaAs 层, 下划线字体表示掺杂层, 掺杂浓度为 $1.6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; 最后生长 80 nm 重掺杂 GaAs 上接触层, 其 Si 掺杂浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。

图 2 是 THz QCL 有源区材料的高分辨 X 射线衍射曲线, 测试曲线中衍射最强的为 GaAs 衬底(004)峰, 有源区超晶格的 0 级衍射峰与衬底峰重合。在衬底峰的左右两边分别是有源区超晶格的负一级衍射峰和正一级衍射峰。此外, 还有许多超晶格特有的多级衍射峰, 衍射峰的周期由外延层多量子阱周期决定。只有当超晶格材料的界面足够平整时, 才会出现一定强度的多级衍射峰。从图中可以看到, 实验所制备样品的高分辨 X 射线谱中出现多级衍射卫星峰, 卫星峰具有较高的强度和较窄的半高宽, 这表明有源区材料生长体质量较好, 周期界面平整。根据薄膜 X 射线衍射理论, 通过这些衍射峰的位置可以计算出超晶格材料的周期厚度:

$$d = \frac{\lambda(n_1 - n_2)}{2 \times (\sin \theta_1 - \sin \theta_2)} \quad (1)$$

式中: d 是超晶格材料的周期厚度; λ 是 X 射线的波长; n_1 和 n_2 是衍射条纹的级数; θ_1 和 θ_2 分别是第 n_1 级和第 n_2 级衍射峰的衍射角。由公式(1)计算出的周期厚度为 128.5 nm, 与理论设计的 128.6 nm 周期厚度一致, 这表明在材料生长过程中实现了有源区厚度的精确控制。

实验采用半绝缘等离子体波导结构^[12]。通过接触光刻和湿法腐蚀的方法制作出激光器的脊型台面结构, 腐蚀深度达到腐蚀到重掺杂下接触层。随后利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 GeAu/Ni/Au, 并在 N_2 环境下退火, 形成欧姆接触电极。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, 另一方面便于通过金丝球焊实现电极引线。另外, 为了加强器件的散热效率以进一步提高器件的性能, 对衬底进行了减薄处理并在背面镀金, 并通过解理获得脊条长度为 1.6 mm, 宽度为 100 μm , 最后采用钢将管芯烧焊到无氧铜热沉上封装成型。此器件后腔面未镀高反射膜。

图 3 所示为激光器的结构示意图和完成器件工艺后高分辨光学照片。

2 器件性能分析

将封装完成的 THz QCL 器件安装在液氮低温制冷机冷头上制冷, 出光端紧密配合安装 Winston 光锥以提高收集效率。采用傅里叶变换光谱仪测量 THz QCL 的激射频谱。器件功率采用 OPHIR 功率探测器进行测量, 测量值和实际输出功率之间, 考虑 PE 窗镜衰减和探测器有效探测面积, 通过面积积分的方法得到实际输出功率是测

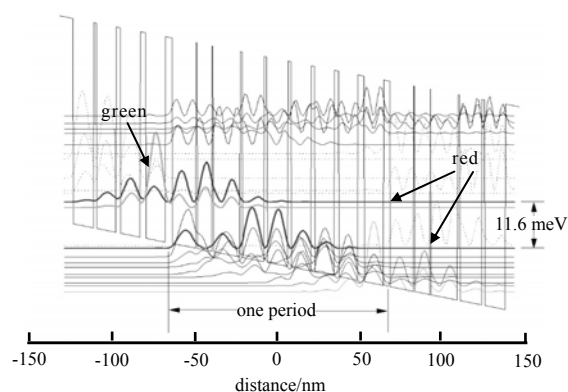


Fig.1 Theory design of the subband structure and the distribution of wave function

图 1 理论计算的子带结构及波函数概率分布

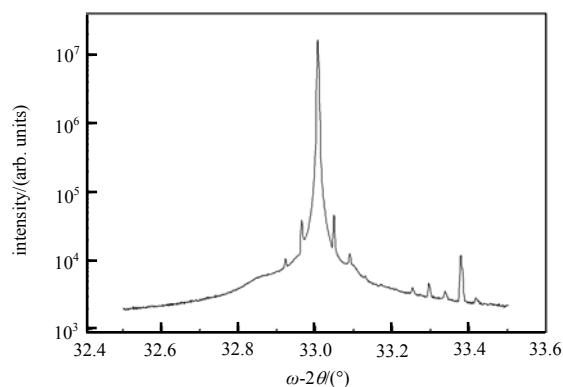


Fig.2 Typical XRD curve of THz QCL sample

图 2 THz QCL 材料 XRD 曲线

量值的 1.73 倍。

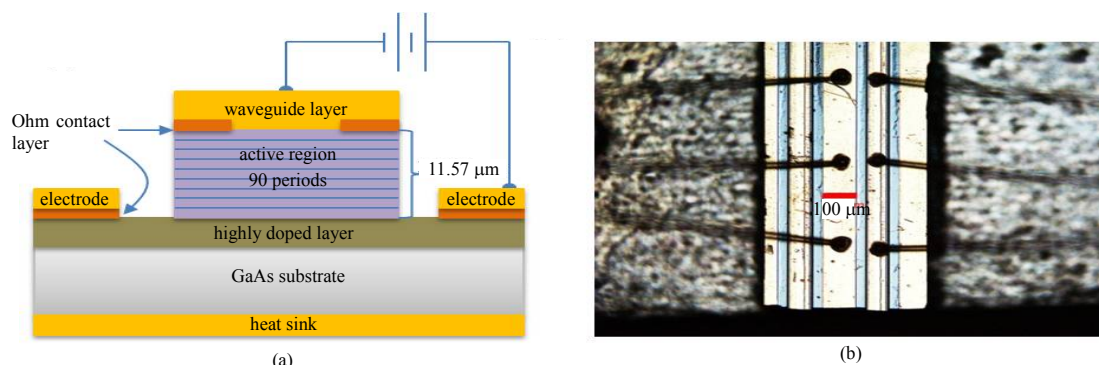


Fig.3 (a) Schematic diagram of THz QCL device; (b) High resolution optical image of THz QCL

图 3 (a) THz QCL 器件结构示意图; (b) THz QCL 光学照片

图 4 是器件连续波模式下 10 K 工作温度下的光功率-电流-电压(Light output power-Current-Voltage, L-I-V)特性曲线, 其中插图是对应 10 K 温度下的激光谱。通过 I - U 曲线, 可以看到该器件的阈值电压为 3.69 V, 对应电场强度为 3.2 kV/cm, 阈值电流密度为 156 A/cm^2 。器件具有较宽的工作电流范围, 在 10 K 工作温度下从 250 mA 到 430 mA 均可实现连续波激光。从激光光谱图中可以看到激光频率为 2.93 THz。该器件在 10 K 时的最大输出功率为 7.84 mW, 对应激励电流为 410 mA。

图 5 是微分电阻随电流密度的变化关系, 当电流密度小于 50 A/cm^2 时(对应电压 1.7 V), 相邻周期间的微带还存在交叠, 此时电子在 2 个周期间的输运主要通过微带中能级间的共振隧穿来进行, 随着电流的增大, 相邻周期微带的交叠区域逐渐减小, 共振隧穿效应减弱, 导致微分电阻逐渐增大。Barbieri 等^[10]认为这种微带间的电子跃迁形成的漏电流是抑制阈值电流密度进一步降低的重要因素, 通过减小这种漏电流可以减小阈值电流密度。而当电流密度大于 50 A/cm^2 时, 上一个周期的微带和辐射跃迁上能级开始交叠, 电子开始注入到上能级, 导致微分电阻开始急剧下降。当电流进一步上升至阈值电流 156 A/cm^2 时, 微分电阻出现一个突然的降低, 此时, 上下能级间实现了粒子数反转, 电子从上能级跃迁至下能级, 同时辐射出光子, 实现器件激光。随后微分电阻逐渐上升, 当电压上升至 5 V(电流密度 $\sim 260 \text{ A/cm}^2$)左右时, 微带底能级高度已经超过辐射跃迁上能级, τ_1/τ_{21} 比值迅速上升, 其中 τ_1 是电子在下能级的电子寿命, τ_{21} 是电子辐射跃迁的弛豫时间^[14]。导致微分电阻急剧上升, 而对应的光输出功率急剧下降。

图 6 是激光电流为 350 mA 时, 器件输出功率随温度的变化曲线。随着温度的升高, 输出光功率持续下降, 当器件工作温度上升到 62 K, 仍然有 $8 \mu\text{W}$ 的输出光功率。需要指出的是, 本文在器件工艺方面还通过在激光器后端面镀反射膜, 并优化器件的刻蚀及欧姆接触工艺, 进一步降低阈值电流, 提高激光输出功率。

3 结论

本文采用分区级数解法理论计算了束缚态-连续 THz QCL 有源区的能级结构及波函数概率分布, 通过固源分子束外延系统制备了该结构的有源区材料, 通过高分辨力 XRD 分析了有源区材料具有晶体质量且厚度控制精确。基于半绝缘-等离子体波导工艺完成了 THz QCL 器件制作, 测试结果表明, 其激光频率为 2.93 THz, 与理论设计的频率 2.8 THz 接近, 其在 10 K 工作温度下连续波阈值电流密度为 156 A/cm^2 , 最大光输出功率 7.84 mW。

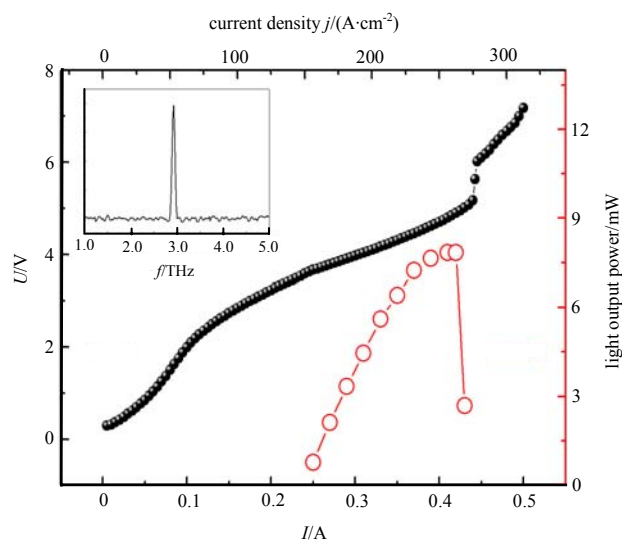


Fig.4 Light output power-current-voltage curve of THz QCL in continuous-wave mode at 10 K, the inset is lasing spectrum of THz QCL at 10 K

图 4 10 K 连续波工作模式下器件的 L-I-V 特性曲线, 插图为器件在 350 mA 激励电流、10 K 工作温度下的激光光谱。

器件的最高连续波工作温度为 62 K, 为了进一步提高器件的性能, 可考虑通过在激光器后端面镀反射膜及优化器件的刻蚀工艺及欧姆接触工艺进一步降低阈值电流, 提高激光输出功率。

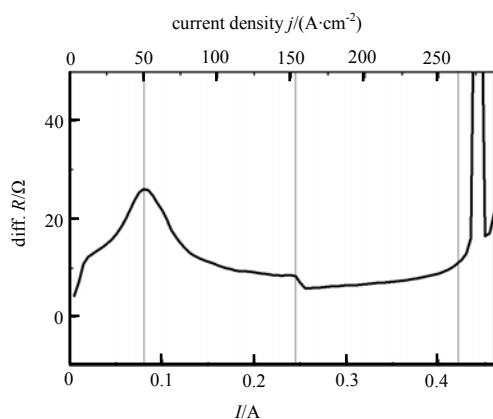


Fig.5 Current dependence of the differential resistance of THz QCL under 10 K

图 5 10 K 工作温度下器件微分电阻随电流的变化关系

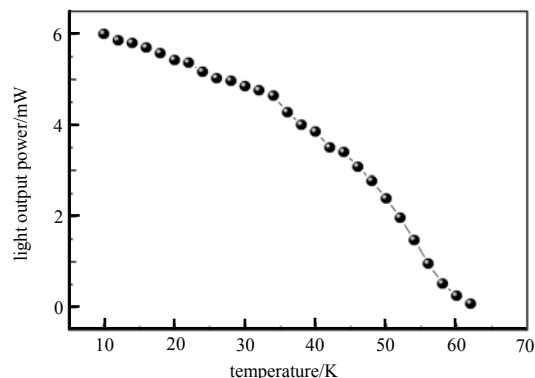


Fig.6 Temperature dependence of the lasing output power of THz QCL in continuous-wave mode, the current is fixed as 350 mA

图 6 连续波工作模式下激光功率随温度的变化关系, 电流为 350 mA

参考文献:

- [1] WILLIAMS B S. Terahertz quantum-cascade lasers[J]. Nature Photonics, 2007,1(1):517-525.
- [2] KÖHLER R, TREDICUCCI A, BELTRAM F, et al. Terahertz semiconductor-heterostructure laser[J]. Cheminform, 2002,33(31):156-159.
- [3] KUMAR S, HU Q, RENO J L. 186 K operation of terahertz quantum-cascade lasers based on a diagonal design[J]. Applied Physics Letters, 2009,94(13):131105-131105-3.
- [4] WILLIAMS B S, KUMAR S, HU Q, et al. High-power terahertz quantum-cascade lasers[J]. Electronics Letters, 2006,42(2):89-91.
- [5] CAO J C, LI H, HAN Y J, et al. Terahertz quantum cascade laser at 3.39 THz[J]. Chinese Physics Letters, 2008,25(3):953-956.
- [6] ROCHAT M, AJILI L, WILLENBERG H, et al. Low-threshold terahertz quantum-cascade lasers[J]. Applied Physics Letters, 2002,81(8):1381-1383.
- [7] SCALARI G, WALTHER C, FAIST J, et al. Electrically switchable, two-color quantum cascade laser emitting at 1.39 and 2.3 THz[J]. Applied Physics Letters, 2006,88(14):141102-141102-3.
- [8] 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.)
- [9] FAIST J, BECK M, AELLEN T, et al. Quantum-cascade lasers based on a bound-to-continuum transition[J]. Applied Physics Letters, 2001,78(2):147-149.
- [10] BARBIERI S, ALTON J, BEERE H E, et al. 2.9 THz quantum cascade lasers operating up to 70 K in continuous wave[J]. Applied Physics Letters, 2004,85(8):1674-1676.
- [11] WILLIAMS B S, CALLEBAUT H, KUMAR S, et al. 3.4 THz quantum cascade laser based on longitudinal-optical-phonon scattering for depopulation[J]. Applied Physics Letters, 2003,82(7):1015-1017.
- [12] WANG T, LIU J Q, CHEN J Y, et al. Continuous-wave operation of terahertz quantum cascade lasers at 3.2 THz[J]. Chinese Physics Letters, 2013,30(6):064201-343.
- [13] 朱嘉麟, 唐道华. 电场下 GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs 量子阱中的子带和激子[J]. 物理学报, 1989,38(3):385-392. (ZHU Jialin, TANG Daohua. Subbands and excitons in a GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs quantum well in an electric field[J]. Acta Physica Sinica, 1989,38(3):385-392.)
- [14] SIRTORI C, CAPASSO F, FAIST J, et al. Resonant tunneling in quantum cascade lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electron, 1998,34(9):1722-1729.