

## 2.9 THz 束缚态向连续态跃迁量子级联激光器研制\*

万文坚 尹嵘 谭智勇 王丰 韩英军 曹俊诚†

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 中国科学院太赫兹固态技术重点实验室, 上海 200050)

(2013年6月25日收到; 2013年7月17日收到修改稿)

采用气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材料, 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. 测量了激光器的发射光谱和功率-电流-电压关系曲线, 研究了器件的激光特性. 器件激光频率约 2.95 THz, 脉冲模式下, 最高工作温度为 67 K. 连续波模式下, 阈值电流密度最低为 230 A/cm<sup>2</sup>, 最大光输出功率 1.2 mW, 最高工作温度为 30 K.

**关键词:** 太赫兹, 量子级联激光器, 分子束外延, 波导

**PACS:** 07.57.Hm, 42.55.Px, 68.65.Fg, 81.15.Hi

**DOI:** 10.7498/aps.62.210701

## 1 引言

太赫兹 (THz) 波<sup>[1-3]</sup> 是一种介于微波与红外之间的电磁波, 频率范围约为 0.1—10 THz, 对应的波长为 30—3000 μm, 具有介质穿透性强、电离性弱以及相干性好等优点. 太赫兹技术在材料特性研究、成像技术、医学诊断、环境监测、无线通信等领域具有广阔的应用前景. 太赫兹量子级联激光器 (THz QCL) 作为一种重要的太赫兹辐射源, 具有体积小、重量轻、易集成以及转换效率高优点, 是太赫兹领域的一个研究热点<sup>[2-8]</sup>. THz QCL 发出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量子级联激光器更加困难. 为了实现粒子数反转, 已有不同的有源区结构被设计出来, 包括啁啾超晶格结构<sup>[9]</sup>、束缚态向连续态跃迁结构<sup>[10,11]</sup> 以及共振声子结构<sup>[5,12]</sup> 等. 第一个 THz QCL 就是采用啁啾超晶格有源区结构设计<sup>[9]</sup>, 辐射跃迁发生在上微带最低态和下微带最高态之间, 电子的抽取依靠微带内散射机理. 由于电子在微带内的散射强于微带间的散射, 从而实现带边态粒子数反转. 共振声子结构设计原理是通过快速的

纵光学声子散射来实现下辐射能级的电子抽取, 从而实现辐射能级间的粒子数反转, 辐射跃迁发生在局域的上辐射能级和下辐射能级之间<sup>[4]</sup>. 束缚态向连续态跃迁结构的辐射跃迁发生在束缚的上辐射态和微带顶部的下辐射态之间, 下辐射态电子的抽取也是依靠微带内散射机理. 由于注入态与上辐射态耦合比跟下微带耦合更强, 电子注入过程更具选择性. 这些设计在器件性能上各有特点, 啁啾超晶格结构在功率和工作温度方面都不及后两者, 束缚态向连续态跃迁结构具有较低的阈值电流, 但工作温度比不上共振声子结构, 而共振声子结构具有很高的阈值电流, 器件焦耳热很大. 此外, 周期材料的不完美性对微带能级的影响比局域能级的影响大, 从这个意义上说, 共振声子结构对材料的生长要求最为严格. 考虑到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, 本文采用气源分子束外延 (GSMBE) 技术生长了束缚态向连续态跃迁的 THz QCL 有源区材料, 然后通过半绝缘等离子体波导工艺<sup>[13]</sup> 制作了 THz QCL 器件, 并且给出了器件的光电特性测试结果.

\* 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (批准号: 2011AA010205)、国家自然科学基金 (批准号: 61131006, 61021064)、国家重大科学仪器设备开发专项 (批准号: 2011YQ150021)、国家科技重大专项 (批准号: 2011ZX02707)、中国科学院知识创新工程重要方向性项目 (批准号: YYYJ-1123-1) 和上海市基础研究重点基金 (批准号: 10JC1417000) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: jccao@mail.sim.ac.cn

## 2 材料生长与器件工艺

THz QCL 有源区采用束缚态向连续态跃迁结构, 材料体系为 GaAs/AlGaAs, 由气源分子束外延设备在半绝缘 GaAs(100) 衬底上外延生长. 外延生长步骤为: 首先在衬底上生长 800 nm 厚的 GaAs 缓冲层; 然后生长 200 nm 厚的  $\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{As}$  刻蚀阻挡层; 再生长 700 nm 厚的重掺杂 GaAs 下接触层, Si 掺杂浓度为  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ; 接着生长 90 个周期的多量子阱, 多量子阱结构与 Barbieri 等<sup>[11]</sup> 的结构类似, 周期结构参数为 **3.7/13.7/0.6/8.8/0.6/15.5/1.5/12.5/1.8/12.0/2.0/11.8/2.0/11.2/2.7/11.1/3.4/11.4** nm, 其中, 粗体表示  $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  势垒层, 下划线字体表示掺杂层, 掺杂浓度为  $1.6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , 普通字体表示 GaAs 层; 之后生长 50 nm 重掺杂 GaAs 上接触层, Si 掺杂浓度为  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ; 最后在上接触层上生长一薄层低温 GaAs 帽层.

采用高分辨率 X 射线衍射仪对 THz QCL 材料进行表征, 如图 1 所示, 其中模拟 XRD 曲线是根据预期的材料参数模拟所得, 通过对比测试 XRD 曲线和模拟 XRD 曲线可以分析生长的材料组分及结构与预期材料之间的偏差. 测试曲线中衍射最强的为 GaAs 衬底 (004) 峰, 衍射次强的为零级衍射峰, 峰位由 Al 组分决定. 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. 只有当材料的周期界面和表面都非常平整时, 才会出现一定强度的多级衍射峰<sup>[14]</sup>. 从图中可以看到, 多级衍射峰峰值较强且半高宽很小, 表明生长的多量子阱材料晶体质量好, 周期界面很平整. 对比测试曲线和模拟曲线, 两条曲线衍射峰对应的很好, 说明实验生长的材料组分和各层厚度较为准确.

本文 THz QCL 器件采用半绝缘等离子体波导工艺制作. 工艺的主要流程包括溅射上电极、湿法腐蚀台面、蒸发下电极以及减薄、解理、封装等后续工艺. 首先采用光刻、溅射、剥离等技术在 MBE 生长的 THz QCL 外延片上制作上电极, 磁控溅射的上电极金属层为 Ti/Au(20/250 nm). 然后用光刻胶将金属电极保护起来, 采用湿法腐蚀技术刻蚀出脊型波导结构, 腐蚀液采用  $\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$  (体积比 1:1:25). 为了保证器件电学导通, 需要腐蚀至下

重掺杂层, 腐蚀深度约 12  $\mu\text{m}$ , 如果没有到达下重掺杂层或者下重掺杂层全部被腐蚀掉, 器件电学是断开的. 实验中采用台阶仪控制腐蚀深度, 最后用探针测量器件  $I$ - $V$  特性确认电学导通性. 腐蚀好的外延片再用光刻和剥离等技术制作下电极, 下电极金属层为 GeAuNi/Au(50/250 nm), 采用电子束蒸发技术镀膜. 再对器件进行退火处理以使电极和半导体合金化形成欧姆接触, 退火温度 370  $^\circ\text{C}$ , 退火时间 40 s. 将衬底减薄至 120  $\mu\text{m}$  左右, 然后解理出端面, QCL 长度为 3 mm, 图 2 是器件解理端面的 SEM 图, 下电极金属层分布在脊波导的两侧, 局部放大图中可以清晰地看见衬底和外延层以及上电极金属层. 最后, 用钢片将解理的小芯片焊接在铜热沉上, 金丝直接热压键合在上、下电极上并引出电极管脚以便于器件测试.

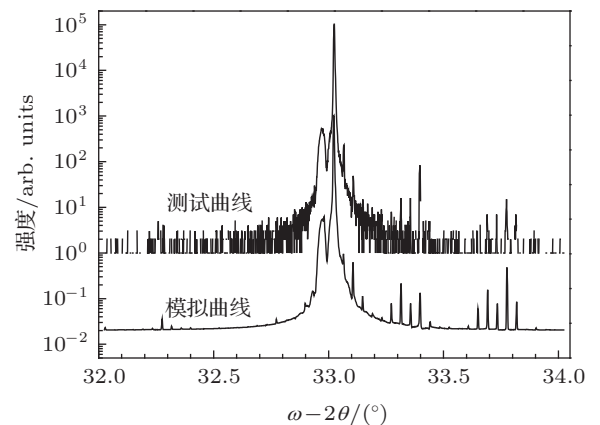


图 1 THz QCL 材料 XRD 曲线及模拟 XRD 曲线

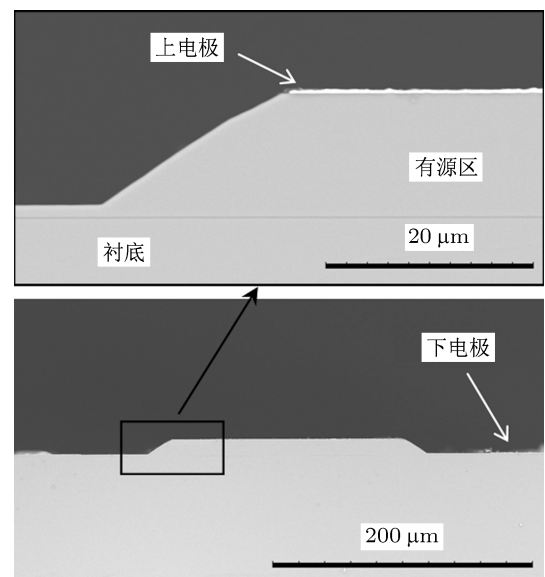


图 2 THz QCL 解理端面 SEM 图

### 3 器件测试与分析

将封装好的 THz QCL 器件安装在温控冷头里制冷, 采用 Bruker IFS 66v/S 远红外傅里叶变换光谱仪测量 THz QCL 的激射谱, 采用 AVTECH AVO-6C-B 脉冲源对器件进行供电, 器件电流通过电流探针测量, 焦热电探测器测量器件的光功率.

图 3 是 3 mm 长、180 μm 宽的 THz QCL (器件编号 W1303A) 脉冲模式下的电流-电压 ( $I$ - $V$ ) 特性. 脉冲电源重复频率为 2 kHz (占空比 1%), 脉宽为 5 μs. 插图是不同工作温度下光强最大时的激射谱. 9 K 工作温度下, 器件表现为多模激射, 最强峰对应为 2.94 THz, 各峰间距相等, 这是典型的 F-P 腔多模激射现象. 相邻谱峰的间距均为 0.015 THz, 谱峰间距  $\Delta f$  满足公式

$$\Delta f = \frac{c}{2n_{\text{eff}}l},$$

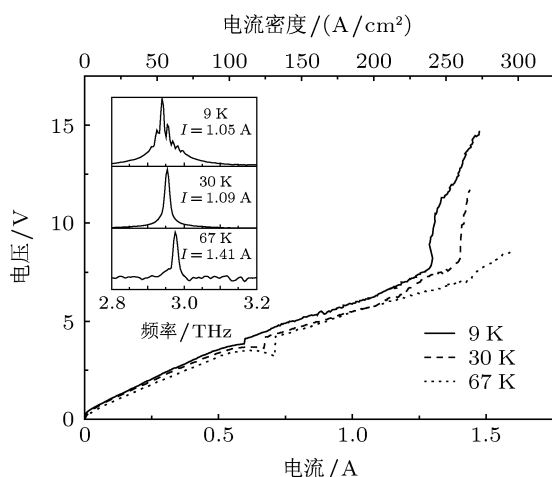


图 3 THz QCL 脉冲模式下  $I$ - $V$  特性 (插图为不同温度下的激射谱)

式中,  $n_{\text{eff}}$  为有效折射率,  $l$  为腔长,  $c$  为光速. 由此可推算出本 THz QCL 有效折射率为 3.33, 与 Kohen 等 [15] 采用的有效折射率 3.6 相比稍偏小. 随着工作温度的增加, 器件变为单模激射, 激光峰值向高频方向移动. 这种峰位移动是 F-P 腔激光模式的跳变, 说明了这是由于材料的增益谱向高频方向移动引起的. 脉冲模式下, 器件最高工作温度为 67 K, 表现为单模激射, 激射频率 2.97 THz. 从  $I$ - $V$  曲线上看, 随着温度的增加, 器件的电阻变小, 曲线向右方移动. 值得注意的是, 在电流 0.6 A 附近, 曲线出现奇特的负微分电阻区域, 负阻到最大的时候, 电压急剧回升, 这跟通常的  $n^+$ - $n$ - $n^+$  结击穿特性 [16]

不同, 且随着温度的增加这种现象更加明显. 这种现象在其他连续态向束缚态跃迁结构激光器中并没有出现 [6,8], 并且实验中同一批次其他器件也没有这种现象, 暂时此处只能归结为工艺可靠性问题.

图 4 是器件连续波模式下的光功率-电流-电压 ( $L$ - $I$ - $V$ ) 特性. 插图是 9 K 工作温度时的激射谱. 9 K 工作温度下, 阈值电流密度约 230 A/cm<sup>2</sup>, 器件表现为单模激射, 激射频率 2.95 THz, 最大输出光功率约 1.2 mW. 器件最高工作温度为 30 K, 阈值电流密度增大至 250 A/cm<sup>2</sup>, 最大输出光功率仍有 0.4 mW, 且有很宽的电流激射范围.

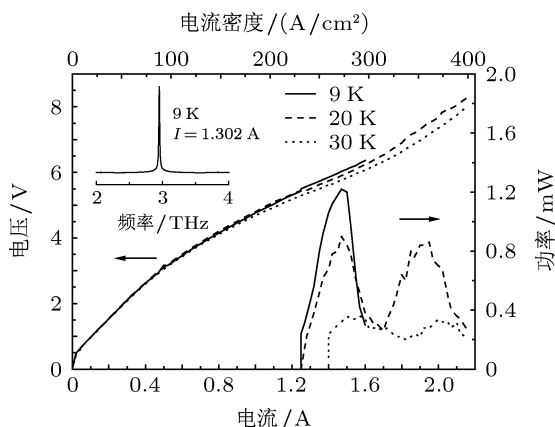


图 4 THz QCL 连续波模式下  $L$ - $I$ - $V$  特性 (插图为 9 K 下的激射谱)

需要说明的是, 本文在器件工艺方面还存在一些问题需要加以改进以提高激光器的性能. 首先, 激光器后端面没有镀反射膜, 器件镜面损耗较大, 结果造成阈值电流增大并且激光输出功率减小. 其次, 从波导端面 SEM 图看出, 湿法腐蚀侧壁倾角较小. 器件工作时, 大部分电流直接从下重掺杂层垂直向上电极, 上电极垂直区域外多出的三角区域增益小, 相当于增加了波导损耗. 采用干法刻蚀可以得到陡直的侧壁, 但是干法刻蚀会对材料产生损伤与污染, 并且干法刻蚀的平面粗糙度比湿法腐蚀大. 综合考虑, 可以采用干法刻蚀结合湿法腐蚀的方法, 先干法刻蚀出主要形状, 然后再湿法腐蚀一薄层, 既保证了刻蚀的各向异性, 又保证了腐蚀面的洁净与平整. 另外, 在连续波模式测量下, 激光强度刚开始很强, 达到稳定后, 强度有所降低, 说明器件的散热性很差. 要提高器件的散热性, 需要尽量减薄衬底并且保持衬底与热沉良好的导热性. 实验中存在的问题是器件与热沉的导热性不良, 钢片与

GaAs 衬底界面退火时浸润不好, 并且铜片表面有氧化的倾向. 拟改进的措施是减薄衬底之后再在背面溅射一层 Au 薄膜, 利用 Au-In 合金反应形成良好的热接触.

#### 4 结论

本文采用 GSMBE 系统生长了束缚态向连续态跃迁结构的 THz QCL 有源区材料, 高分辨率 XRD 分析表明, 生长的有源区材料晶体质量高, 组分和各层厚度跟预计的参数相比较为准确. 基于半绝缘等离子体波导工艺制作了 THz QCL 器件,

远红外傅里叶变换光谱仪分析了器件的光谱特性, 并测量了器件的  $L-I-V$  特性. 器件激射频率约 2.95 THz, 脉冲模式下, 9 K 工作温度下器件表现为 F-P 腔多模激射, 具有很宽的频谱范围. 随着工作温度增大, 器件变为单模激射, 最高工作温度为 67 K. 连续波模式下, 器件为单模激射, 阈值电流密度最低为 230 A/cm<sup>2</sup>, 最大光输出功率 1.2 mW, 最高工作温度为 30 K. 为了进一步提高器件的性能, 可考虑端面镀高反射膜以降低激光器的镜面损失、各向异性刻蚀以降低波导损耗以及减薄片背面镀金以提高器件的散热性能.

- 
- [1] Cao J C 2006 *Physics* **35** 632 (in Chinese) [曹俊诚 2006 物理 **35** 632]  
 [2] Ma Y R, Guo S F, Duan S Q 2012 *Chin. Phys. B* **21** 037804  
 [3] Fu A B, Hao M R, Yang Y, Shen W Z, Liu H C 2013 *Chin. Phys. B* **22** 026803  
 [4] Williams B S 2007 *Nat. Photon.* **1** 517  
 [5] Cao J C, Li H, Han Y J, Tan Z Y, Lü J T, Luo H, Laframboise S, Liu H C 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 953  
 [6] Liu J Q, Chen J Y, Liu F Q, Li L, Wang L J, Wang Z G 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 104205  
 [7] Kumar S 2011 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **17** 38  
 [8] Wang T, Liu J Q, Chen J Y, Liu Y H, Liu F Q, Wang L J, Wang Z G 2013 *Chin. Phys. Lett.* **30** 064201  
 [9] Köhler R, Tredicucci A, Beltram F, Beere H E, Linfield E H, Davies A G, Ritchie D A, Iotti R C, Rossi F 2002 *Nature* **417** 156  
 [10] Faist J, Beck M, Aellen T, Gini E 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 147  
 [11] Barbieri S, Alton J, Beere H E, Fowler J, Linfield E H, Ritchie D A 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 1674  
 [12] Williams B S, Callebaut H, Kumar S, Hu Q, Reno J L 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 1015  
 [13] Li H, Han Y J, Tan Z Y, Zhang R, Cao J C *Acta Phys. Sin.* **59** 2169 (in Chinese) [黎华, 韩英军, 谭智勇, 张戎, 曹俊诚 2010 物理学报 **59** 2169]  
 [14] Chang J, Li H, Han Y J, Tan Z Y, Cao J C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7083 (in Chinese) [常俊, 黎华, 韩英军, 谭智勇, 曹俊诚 2009 物理学报 **58** 7083]  
 [15] Kohen S, Williams B S, Hu Q 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 053106  
 [16] Lu X X, Luo H W, Yao R H, Lin Z C 2008 *Microelectronics* **38** 469 (in Chinese) [路香香, 罗宏伟, 姚若河, 林志成 2008 微电子学 **38** 469]

# Study of 2.9 THz quantum cascade laser based on bound-to-continuum transition\*

Wan Wen-Jian Yin Rong Tan Zhi-Yong Wang Feng  
Han Ying-Jun Cao Jun-Cheng<sup>†</sup>

(Key Laboratory of Terahertz Solid-State Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

(Received 25 June 2013; revised manuscript received 17 July 2013)

## Abstract

The material of GaAs/AlGaAs bound-to-continuum terahertz quantum-cascade laser (THz QCL) was grown by gas source molecular beam epitaxy. A THz QCL device was fabricated with semi-insulating surface-plasmon waveguide. Its spectrum and light intensity-current-voltage characteristics were studied. The device emits about 2.95 THz, and yields a maximum temperature of 67 K in pulse mode. In continuous-wave mode, it displays a threshold current density of 230 A/cm<sup>2</sup> at 9 K with maximum emitted power of 1.2 mW and lases up to 30 K.

**Keywords:** terahertz, quantum cascade lasers, molecular beam epitaxy, waveguide

**PACS:** 07.57.Hm, 42.55.Px, 68.65.Fg, 81.15.Hi

**DOI:** 10.7498/aps.62.210701

---

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2011AA010205), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61131006, 61021064), the Major National Development Project of Scientific Instrument and Equipment, China (Grant No. 2011YQ150021), the National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 2011ZX02707), the Main Direction Program of Knowledge Innovation of Chinese Academy of Sciences (Grant No. YYYJ-1123-1), and the Shanghai Municipal Commission of Science and Technology, China (Grant No. 10JC1417000).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: jccao@mail.sim.ac.cn