

半绝缘等离子体波导太赫兹量子级联激光器工艺研究*

黎 华 韩英军 谭智勇 张 戎 曹俊诚[†]

(信息功能材料国家重点实验室,中国科学院上海微系统与信息技术研究所,上海 200050)

(2009 年 5 月 31 日收到;2009 年 7 月 8 日收到修改稿)

采用气态源分子束外延设备生长了 GaAs/AlGaAs 束缚态到连续态跃迁结构的太赫兹 (THz) 量子级联激光器 (QCL) 有源区结构,研究了半绝缘等离子体波导 THz QCL 的器件工艺,采用远红外傅里叶变换光谱仪以及探测器测量了器件的电光特性. 器件激励频率为 3.2 THz, 10 K 下的阈值电流密度为 275 A/cm².

关键词: 太赫兹, 量子级联激光器, 波导, 器件工艺

PACC: 9580G, 7280E, 7820J

1. 引 言

量子级联激光器(QCL)是一种电抽运的单极器件,电子通过在子带间的光学跃迁辐射出光子. 在 QCL 中,子带能级之间的能量差由量子阱和垒的宽度决定. 通过改变势阱和势垒的宽度,可以改变激光能级之间的能量差,从而控制辐射光子的频率,这称之为“能带工程”. 一个完整的 QCL 的有源区由几十甚至几百个周期组成,电子每经过一个周期就发射一个光子. 现在, QCL 的波长覆盖范围可以从 3 μm ^[1]一直到 250 μm ^[2],通过外加磁场的辅助,长波方向甚至可以到 350 μm ^[3]. 目前,还没有另外一种电抽运的半导体激光器可以覆盖这么宽范围的电磁波谱. 第一个中红外 QCL 是由 Faist 及其合作者共同研制成功的^[4],这项工作一直被誉用为“能带工程”的先例. 一直以来,研究人员在太赫兹 (THz) 理论方面,例如 THz 光吸收、THz 源和探测等等,做了大量的研究^[5-9]. 在实验上,世界上首个 THz QCL 于 2002 年诞生,其激励频率为 4.4 THz^[10]. 之后,由于有源区设计和波导结构的不断优化,THz QCL 器件性能经历了快速的发展. 目前,THz QCL 的最高激励功率为 250 mW^[11],最高工作温度为 117 K(连续

波模式)^[12]和 186 K(脉冲模式)^[13].

目前最高工作温度的 THz QCL 器件采用的是共振声子有源区设计以及双面金属波导结构. 共振声子 THz QCL 设计中通过快速的纵光学 (LO) 声子散射来实现下激光能级的电子抽取,抽取效率高,从而可以实现较大的粒子数反转^[14,15]. 但是这种结构的器件阈值电流密度很高,器件焦耳热很大. 双面金属波导结构限制因子高,阈值增益低,适合高温工作. 然而双面金属波导结构的器件光束发散角大,光功率低. 本文所研究的 THz QCL 器件采用束缚态到连续态跃迁有源区设计以及半绝缘等离子体波导结构. 我们详细介绍了半绝缘等离子体波导 THz QCL 的制作工艺,并且给出了器件的电光性能测试结果.

2. 有源区结构、工艺以及性能测试

我们研究的 THz QCL 器件有源区结构采用束缚态到连续态跃迁设计,与 Barbieri 等人的结构设计类似^[16]. 整个有源区材料采用气态源分子束外延 (GSMBE) 设备生长在半绝缘 GaAs (100) 衬底之上. 首先在 GaAs (100) 之上生长一层 GaAs 缓冲层,接着生长一层 700 nm 厚的 n⁺ GaAs 下接触层(掺杂浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$). 在下接触层之上生长 THz

* 国家重点基础研究发展计划(批准号:2007CB310402),国家自然科学基金(批准号:60721004,60606027)、中科院重要方向项目(批准号:KGCX2-YW-231),中科院重大基金和“百人计划”资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: jccao@mail.sim.ac.cn

QCL 有源区结构,有源区由 90 个周期组成,每个周期又由 9 个 GaAs 阱组成.在有源区之上,生长一层 80 nm 厚的 n^+ GaAs 上接触层(掺杂浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$).至此,就完成了整个 THz QCL 材料外延结构的生长.图 1 为自洽计算的束缚态到连续态跃迁 THz QCL 的能带结构图.在外加偏压 $F = 25.4 \text{ mV/module}$ 下,电子从上一周期的束缚态能级 2 跃迁到本周期连续态中的能级 1 上发射 THz 光子.计算得到的发射 THz 光子的能量为 $E_{21} = 13.2 \text{ meV}$ (3.19 THz),辐射谐振强度为 $f_{21} = 10.2$.能级 1 上的电子在微带内通过电子-电子散射进入基态,然后注入到下一周期,完成整个输运过程.

MBE 生长完的 THz QCL 有源区材料采用半绝缘等离子体波导工艺制作器件.整个工艺流程如图 2 所示.首先采用光刻、显影、蒸镀、剥离等技术在 MBE 生长的 THz QCL 有源区结构上制作上电极.采用热蒸发的方法在 n^+ GaAs 上接触层上蒸镀上电极金属 AuGeNi/Au,厚度为 50/250 nm,如图 2(a)所示.然后,将上电极金属用光刻胶保护起来,采用湿法腐蚀的方法制作脊波导结构,如图 2(b)所示.半绝缘等离子体波导 THz QCL 工艺中最关键的一步就是刻蚀工艺.为了保证器件最终电学导通,刻蚀深度的控制尤为重要.如果刻蚀深度没有到达 n^+ GaAs 下接触层或者完全将下接触层刻蚀掉,那么最终的器件电学上是断开的,根本无法工作.我们在实验中采用湿法腐蚀的方法刻蚀脊波导结构.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).腐蚀速率和腐蚀深度通过台阶仪来测定.腐蚀之前,首先对光刻胶进行“坚膜”处理,使之不会在腐蚀过程中被腐

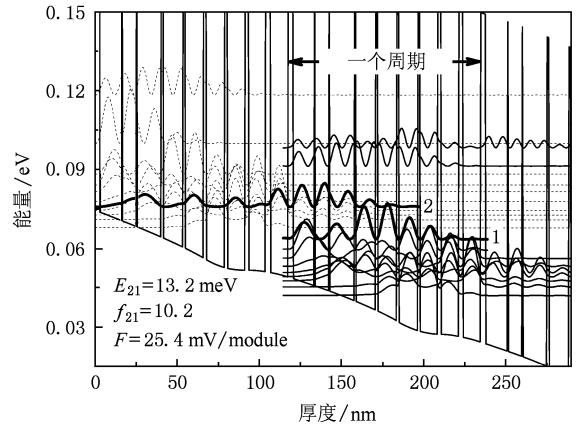


图 1 束缚态到连续态跃迁 THz QCL 导带结构图(从左到右,一个周期内各层厚度分别为 3.6/13.2/0.57/8.5/0.57/14.9/1.4/12.0/1.7/11.5/1.9/11.3/1.9/10.7/2.6/10.6/3.3/10.9 nm,其中黑体表示 $\text{Al}_{0.155}\text{Ga}_{0.845}\text{As}$ 势垒层,斜体表示 GaAs 阱层,11.3 nm 和 10.7 nm 的 GaAs 阱层是掺杂层,掺杂浓度为 $1.7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$)

蚀液腐蚀掉.为了保证腐蚀的均匀性,我们采用的腐蚀溶液比较稀,因此腐蚀时间较长.制作好脊波导结构之后,我们就需要制作下电极,如图 2(c)所示.此时,需要将上电极保护起来,然后蒸镀下电极金属 AuGeNi/Au (50/250 nm).由于脊波导结构的存在,为了完全保护好上电极金属,我们需要采用较厚的光刻胶.之后,将做好脊型波导结构和上下电极的晶片进行快速热退火使电极金属与半导体合金化形成欧姆接触,退火温度 390°C ,退火时间 40 s.最后,我们需要进行衬底减薄工艺,如图 2(d)所示.因为 THz QCL 的工作电流密度比较大,所以器件工作过程中会产生大量的焦耳热.为了增强器件的热传导

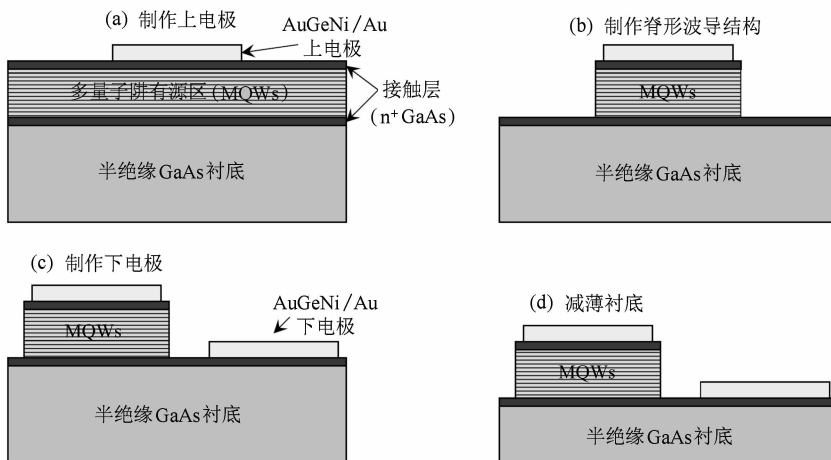


图 2 半绝缘等离子体波导 THz QCL 工艺流程示意图 (a) 制作上电极;(b) 制作脊形波导结构;(c) 制作下电极;(d) 减薄衬底

能力,从而提高器件性能,我们需要对半绝缘 GaAs 衬底进行减薄. 一般衬底减薄到 $100\ \mu\text{m}$ 左右就可以了.

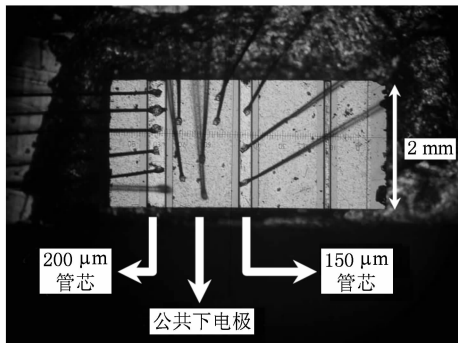


图3 解离封装后的 THz QCL 器件照片

制作完工艺的 THz QCL 晶片,我们首先解离成一定尺寸的管芯,然后通过钢将管芯焊接在铜热沉上,最后进行焊线封装. 对于宽脊条 ($100\text{--}200\ \mu\text{m}$) 的管芯来说,由于上电极金属硬度足够大,能够很好地保护好有源区结构,所以焊线可以直接在上电极金属上进行. 图3为封装好的 THz QCL 器件照片,器件腔长为 $2\ \text{mm}$,所有管芯都共用同一个下电极.

封装好的 THz QCL 器件就可以进行电光性能的测试了. 我们采用脉冲模式进行测量. 脉冲电源由 AVTECH AVO-6C-B 和 Agilent 8114 A 提供. 器件电流通过电流探针测量. 采用远红外傅里叶变换光谱仪和焦热电探测器测量 THz QCL 器件的激光谱和光功率.

3. 结果与讨论

图4为 $2\ \text{mm}$ 长、 $150\ \mu\text{m}$ 宽的 THz QCL 器件的脉冲光-电流-电压 ($L\text{-}I\text{-}V$) 特性. 器件工作温度为 $10\ \text{K}$,脉冲宽度 $3\ \mu\text{s}$,重复频率为 $1\ \text{kHz}$. 从图4,我们可以看出在 $300\ \text{A}/\text{cm}^2$ 的地方, $I\text{-}V$ 曲线出现了一个明显的拐点. 当电压继续增大的时候,电流并没有随着继续增大. 这主要是由于电压增大,各个周期的能级之间不能很好地对齐,从而导致电子不能顺畅

的在各个周期内输运. 电子输运受到阻碍之后,辐射跃迁也会受到影响. 辐射跃迁粒子数反转变小,从而导致输出光功率降低,如图4中的 $L\text{-}I$ 曲线所示. 器件在 $10\ \text{K}$ 下的阈值电流密度为 $275\ \text{A}/\text{cm}^2$,最大光功率对应的电流密度为 $297\ \text{A}/\text{cm}^2$. 插图分别为器件在驱动电流 $I=0.84\ \text{A}$ (阈值附近) 和 $I=0.89\ \text{A}$ (最大光输出) 的激光谱. 从插图我们可以清晰地看到,器件始终是单模工作,激光频率为 $3.2\ \text{THz}$,与我们自洽计算的结果十分符合. 随着外加偏压的增大,我们没有观察到激光频率蓝移的现象^[17].

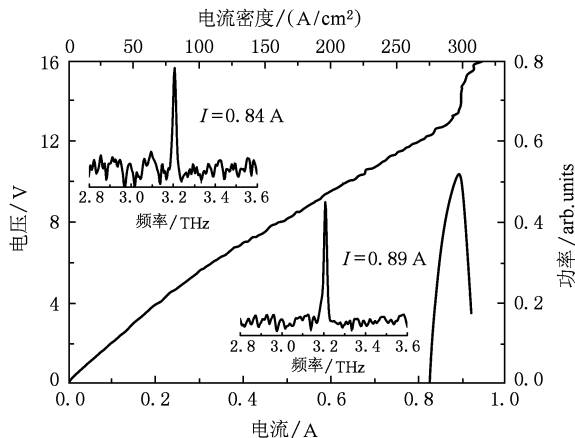


图4 腔长 $2\ \text{mm}$ 、脊宽 $150\ \mu\text{m}$ 的 THz QCL 器件在低温 $10\ \text{K}$ 下的脉冲 $L\text{-}I\text{-}V$ 特性 (插图分别为驱动电流 $I=0.84\ \text{A}$ 和 $I=0.89\ \text{A}$ 下的典型激光谱. 脉冲测试条件为 $3\ \mu\text{s}$ 脉宽和 $1\ \text{kHz}$ 重复频率 (占空比 3%))

4. 结 论

本文采用气态源分子束外延方法生长了束缚态到连续态跃迁 THz QCL 有源区结构,采用半绝缘等离子体波导工艺制作了器件. 详细介绍了器件的制作工艺. 测量了器件的电光特性,在 3% 占空比脉冲工作模式下,器件 $10\ \text{K}$ 下的阈值电流密度为 $275\ \text{A}/\text{cm}^2$,最大光功率对应的电流密度为 $297\ \text{A}/\text{cm}^2$. 器件激光频率为 $3.2\ \text{THz}$. 随着偏压的增大,器件始终处于单模激光模式,没有观察到激光频率蓝移现象.

[1] Semtsiv M P, Wienold M, Dressler S, Masselink W T 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 051111

[2] Walther C, Fischer M, Scalari G, Terazzi R, Hoyler N, Faist J 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 131122

- [3] Faist J, Scalari G, Walther C, Fischer M 2007 *Materials Research Society Spring Meeting*, San Fransisco, California, April 2007
- [4] Faist J, Capasso F, Sivco D L, Sirtori C, Hutchinson A L, Cho A Y 1994 *Science* **264** 553
- [5] Iotti R C, Rossi F 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 146603
- [6] Cao J C 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 237401
- [7] Zhang Y H, Wang C 2006 *Chin. Phys.* **15** 649
- [8] Wang C, Zhang Y H 2006 *Chin. Phys.* **15** 2120
- [9] Ma M R, Chen Y L, Wang L M, Wang C 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1854
- [10] 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
- [11] Williams B S, Kumar S, Hu Q, Reno J L 2006 *Electron. Lett.* **42** 89
- [12] Williams B S, Kumar S, Hu Q, Reno J L 2005 *Opt. Express* **13** 3331
- [13] Kumar S, Hu Q, Reno J L 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 131105
- [14] Li H, Cao J C, Lü J T, Han Y J 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 221105
- [15] Li H, Cao J C and Lu J T 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 103113
- [16] Barbieri S, Alton J, Beere H E, Fowler J, Linfield E H, Ritchie D A 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 1674
- [17] Li H, Cao J C, Han Y J, Guo X G, Tan Z Y, Lü J T, Luo H, Laframboise S R, Liu H C 2008 *J. Appl. Phys.* **104** 043101

Device fabrication of semi-insulating surface-plasmon terahertz quantum-cascade lasers *

Li Hua Han Ying-Jun Tan Zhi-Yong Zhang Rong Cao Jun-Cheng[†]

(State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, 865 Changning Road, Shanghai 200050, China)

(Received 31 May 2009; revised manuscript received 8 July 2009)

Abstract

The active region of GaAs/AlGaAs bound-to-continuum terahertz quantum-cascade laser (THz QCL) is grown by gas-source molecular beam epitaxy. The device fabrication process of semi-insulating surface-plasmon THz QCL is studied in detail. The electrical and optical characteristics of the fabricated THz QCL device are measured using a far-infrared Fourier transform infrared spectrometer with a deuterated triglycerine sulfate far-infrared detector. At 10 K, the measured lasing frequency is 3.2 THz and the threshold current density is 275 A/cm².

Keywords: terahertz, quantum-cascade laser, waveguide, device process

PACC: 9580G, 7280E, 7820J

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2007CB310402), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60721004, 60606027), the Major Project (Grant No. KGCX2-YW-231) and "Hundred Scholar Plan" of the Chinese Academy of Sciences.

[†] Corresponding author. E-mail: jccao@mail.sim.ac.cn