

# InP 基高功率短波长量子级联激光器设计

王琪<sup>1,2</sup>, 刘云<sup>1</sup>, 王立军<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:**阐述了 InP 基高功率短波长量子级联激光器(QCL)的设计原理和设计方案。从有源区设计模型出发,介绍了器件的理想和实际载流子传输路径,进而指出有源区设计的发展趋势和方法。根据器件的发展进程,综述了双声子共振设计,非共振抽取式设计,超强耦合设计,深阱设计,浅阱设计,短注入区设计等先进设计方案,这些设计方案使得 QCL 在低温下的电光转换效率在 50% 以上,最大室温连续输出功率超过 3 W,而器件的特征温度  $T_0$  和  $T_1$  的最大值分别达到 383 K 和 645 K。针对量子级联激光器的短波长高功率提供的先进设计方案扩大了 QCL 在民用与军用领域的应用前景,该设计方案亦可为其它波段量子级联激光器实现室温高功率的设计提供借鉴。

**关键词:**量子级联激光器;高功率激光器;有源区设计;InP 基

**中图分类号:**TN248.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20120501.0083

## Design of InP-based quantum cascade laser with high power and short wavelength

WANG Qi<sup>1,2</sup>, LIU Yun<sup>1</sup>, WANG Li-jun<sup>1\*</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*  
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: wanglj@ciomp.ac.cn*

**Abstract:** The design principles and design methods are introduced for a InP-based Quantum Cascade Laser (QCL) with high power and short wavelength. According to the described ideal and real carrier transition paths, the active region designing trends and approaches to enhance the efficiency of the QCL are also proposed. The most advanced design methods, such as two phonon resonance design, nonresonant extraction design, strong coupling design, deep well design, shallow well design and short injector design are reviewed, respectively. The characteristics and advantages of each design method are discussed. With these highly advanced design approaches, the Wall-plug Efficiency(WPE) of the short wavelength QCL exceeds 50% at low

收稿日期:2011-10-11;修订日期:2011-12-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 10974012, No. 61106047)

temperature and room temperature, continuous wave operation surpasses 3 W and the maximum  $T_0$  and  $T_1$  reach 383 K and 645 K, respectively. As the most advanced working region, high power, advanced design methods make QCL unlimited usage in both military and civilian fields. Moreover, they could also be served as the highly efficient bandstructure pioneer design methods for other working regions.

**Key words:** Quantum Cascade Laser (QCL); high power laser; design of active region; InP base

## 1 引言

量子级联激光器(QCL)<sup>[1]</sup>属于注入式半导体激光器,其物理机制是电子在导带的子带中的共振隧穿,因此也被称为单级器件,其生长技术主要采用分子束外延(MBE)和化学气相沉积(MOCVD)<sup>[2]</sup>,并基于能带工程理论进行设计。在基本的限定条件下(如波长)设计器件能级的基本特征,载流子的散射时间,偶极矩阵元等参数,进而优化器件的传输机制。与传统激光器相比,QCL具有独特的优势:(1)激射波长由有源区层厚决定,而传统的半导体激光器是由材料的禁带宽度决定。(2)级联使其电子有较高的利用率,因而较易实现高功率。QCL已被广泛应用于在中远红外夜视、光学雷达、红外通信、痕量气体监测、化学过程监控,电子对抗等诸多领域,因而引起各国科学家们的广泛重视<sup>[3]</sup>。

3~5  $\mu\text{m}$ 是有效的大气窗口波段。目前这一波段发展最为成熟的结构是 GaInAs/AlInAs/InP ( $\Delta E_c = 0.7 \sim 1.3 \text{ eV}$ ),但由于其导带的带偏移  $\Delta E_c$  较为有限,实现室温下激射波长小于 4  $\mu\text{m}$  的 QCL 很困难,因此,必须考虑增大异质结导带的带偏移。采用高应变补偿的量子阱层可解决这一问题,但目前尚无与其匹配的控制方法。不过在 InP 衬底上生长晶格匹配的 GaInAs/AlAsSb/材料系 ( $\Delta E_c = 1.6 \text{ eV}$ ),或在 GaSb 或 InAs 衬底上外延生长 InAs/AlSb ( $\Delta E_c = 2 \text{ eV}$ ) 可较为理想地实现激射波长为 4  $\mu\text{m}$  以下的 QCL。然而这两种材料系的生长技术与 GaInAs/AlInAs/InP 生长技术相比很不成熟,均存在一些缺陷。其中 GaInAs/AlAsSb 的异质结生长技术的难点主要源于 AlAsSb 材料的生长较难控制;而在 InAs/AlSb 材料系中,同时在每一个界面上更换 III-V 族元

素,会对异质结整体的电学性质产生致命的影响。由于这两种材料系的发展均不理想,本文主要综述了目前已发展较为成熟的 GaInAs/AlInAs/InP 材料系的高功率 QCL 有源区的设计方法。

近几年,3~5  $\mu\text{m}$  大气窗口波段的 QCL 的电光转换效率和输出功率方面发展迅速<sup>[4-20]</sup>。西北大学量子器件中心 M. Razeghi 课题组的短注入区单阱设计在低温下得到大于 50% 的电光转换效率<sup>[17]</sup>,首次实现了 QCL 输出功率大于热损耗。同时,该课题组采用优化的应变补偿超晶格生长技术,先进的热处理设计、先进的加工工艺和封装技术,实现了室温下 4.6  $\mu\text{m}$  QCL 连续输出,功率达 3 W 以上<sup>[6]</sup>,并一直保持世界最高水平。哈佛大学 F. Capasso 课题组采用有源区 5 量子阱的非共振抽取式设计方案获得 4.6  $\mu\text{m}$  的 QCL 的连续输出,功率达到 3 W<sup>[5]</sup>,4.0  $\mu\text{m}$  的 QCL 实现了超过 2 W 的室温连续输出<sup>[9]</sup>(在这之前,4.0  $\mu\text{m}$  的最好结果约为 500 mW)。普林斯顿大学 C. Gmachl 课题组采用基于生长材料界面间粗糙度的超强耦合设计方案,获得了低温下电光转换效率约为 50% 的结果<sup>[12]</sup>。威斯康森大学 D. Botez 和西北大学 M. Razeghi 课题组从提高器件的特征温度出发,分别提出了深阱和浅阱设计方案<sup>[14-15]</sup>,为实现室温下电光转换效率达到 50% 提供了可能<sup>[16]</sup>。

## 2 理论分析

任意波段的 QCL 导带内电子的波函数( $\psi_n$ )以及量子化的能级( $E_n$ )可以通过求解一维有效质量的薛定谔方程和泊松方程来确定。考虑到 Kane 模型内能带的非抛物线性,导带边电子的有效质量方程  $m^*$  可表述为<sup>[21]</sup>:

$$m^*(E, z) = m_c^*(E, z) = m_0 \frac{E - E_v(z)}{E_p}, \quad (1)$$

式中: $E_p$  是 Kane 能量, $E_c - E_v$  由所构成的材料  $m^*(E = E_c = 0)$  的测量值以及非抛物线性系数 ( $\gamma^{-1} = 2m^* |E_c - E_v| / \hbar^2$ )<sup>[22]</sup> 来确定; $m_0$  是自由电子质量, $E$  是电子的能级, $E_c(z)$  是导带某处的电子能量, $E_v(z)$  是有效价带某处的能量,可通过  $E_v(z) = [2E_{lh}(z) + E_{so}(z)]/3$  确定,其中  $E_{lh}(z)$  和  $E_{so}(z)$  是由自旋轨道所引起的轻空穴分裂能级。考虑到应变补偿效应,  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  和  $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$  异质结的有效质量要以  $x$  和  $y$  为变量的差值多项式<sup>[23]</sup> 来确定,而且由于包络函数近似, $E_p$  值在势垒与势阱中是一致的<sup>[24]</sup>,所以只要确定  $m^*$  值,即可确定  $E_p$  值。在器件设计中, $m^*$  和  $\gamma$  一般可以作为输入量<sup>[22]</sup>。

影响 III-V 族半导体量子阱中子带间的跃迁,通常源于电子和纵向光学声子 (Longitudinal optical phonon, LO 声子) 之间的相互作用引起的散射机制。利用费米黄金定律可以计算出散射速率<sup>[25]</sup>:

$$\tau_{if}^{-1} = (1 + n)\tau_{em}^{-1} + n\tau_{abs}^{-1}, \quad (2)$$

其中:

$$n = (e^{\frac{\hbar\omega_{LO}}{kT}} - 1)^{-1}, \quad (3)$$

式中: $\hbar\omega_{LO}$  是 LO 声子的能量, $\tau_{em}^{-1}$  和  $\tau_{abs}^{-1}$  分别是散射的激发速率和吸收速率。

有源区为四量子阱主流设计模型,上、下能级 (即激光发生的两个能级之间) 材料的峰值增益可以由下式表示<sup>[26]</sup>:

$$G_p = z_{43}^2 (n_4 - n_3), \quad (4)$$

其中:

$$n_4 - n_3 = \frac{J}{q} \tau_4 (1 - \frac{\tau_3}{\tau_{43}}), \quad (5)$$

$$z_{43}^2 = \frac{\hbar}{2(E_4 - E_3)} | \langle \psi_3 | p_z \frac{1}{m^*(E_3, z)} + \frac{1}{m^*(E_4, z)} p_z | \psi_4 \rangle |^2, \quad (6)$$

式中: $n_3$  和  $n_4$ ,  $\tau_3$  和  $\tau_4$  分别是子带能级 3 和能级 4 的电子密度和电子寿命,  $z_{43}$  和  $\tau_{43}$  分别是偶极矩阵元和弛豫时间,  $p_z$  是在  $z$  方向的动量算符,  $E_3(\psi_3)$  和  $E_4(\psi_4)$  分别是能级 3 和能级 4 的电子的能级 (波函数)。不难看出,要得到最大的光学增益就要增大能级之间的粒子数反转差值和偶极矩阵元。

### 3 理想与实际传输路径

QCL 中载流子的理想传输路径如图 1 所示<sup>[2]</sup>,外加电场使导带产生线性倾斜。能级 2 和能级 1 之间的能量差被设计成该材料系中一个 LO 声子的能量。在适当的偏置电压下,电子由注入区共振隧穿到下一个周期有源区的上能级 3,后跃迁到该周期的下能级 2,再弛豫到能级 1 之中,同时释放 LO 声子;进而迅速地进入该周期的注入区,在外加电场的调制下,重新获得能量,再

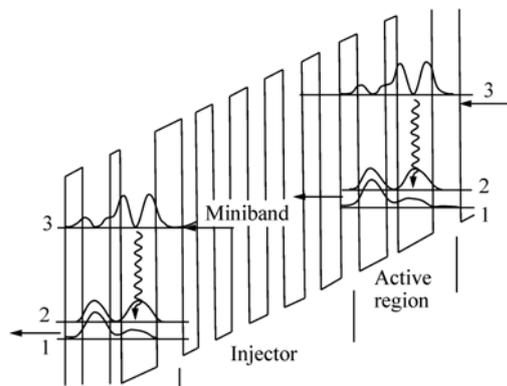


图 1 中间夹有一个注入区的两个有源区的导带能级示意图

Fig. 1 Design model with an injector region between two active regions

通过共振隧穿成为下周期的注入电子。实际上电子会有很多散射路径,如图 2 所示<sup>[2]</sup>,这些漏电

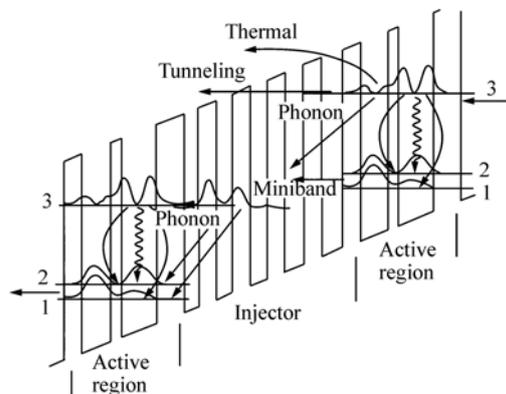


图 2 载流子的实际传输路径

Fig. 2 Real paths of carriers in QCL

流会增大阈值电流。消除这些散射路径的方法如下:首先,电子可从注入区的最低能级散射到下一个有源区的能级2和能级1中,它可等效成QCL的并联电流,影响注入效率 $\eta$ 。电子也可以散射到注入区的能级,使上能级寿命 $\tau_3$ 降低,并导致增益的降低。注入区可提供电子的布喇格反射,从而有效地抑制上能级3以外的能级发生共振隧穿。而对于短波长的设计,上能级3基本位于导带准连续体,电子可通过热激发或共振隧穿泄漏到连续体中。此时,电子会被电场无限制加速,这不是QCL工作状态中所希望的。

## 4 高功率短波长有源区的先进设计

### 4.1 双声子共振跃迁

双声子共振跃迁是有效的 $4.5\ \mu\text{m}$ 附近激光波长的设计基础。其有源区为四量子阱结构,激光发生在上能级4和下能级3之间,能级3和能级2之间与能级2和能级1之间的能量差被设计成一个LO声子的能量差,在下能级3上的电子通过双声子共振跃迁的方式被高效地抽送到最低能级。这种设计有效地降低了能级3的寿命,有较高的注入效率和较短的下能级寿命,而且较宽的势阱降低了生长层面之间的散射。通过应变补偿, $\text{Ga}_{0.322}\text{In}_{0.678}\text{As}/\text{Al}_{0.635}\text{In}_{0.365}\text{As}$ 得到较高的势垒高度,而较大的能级差是设计短波长器件的基础。这种设计方案可使电子共振隧穿到连续体中

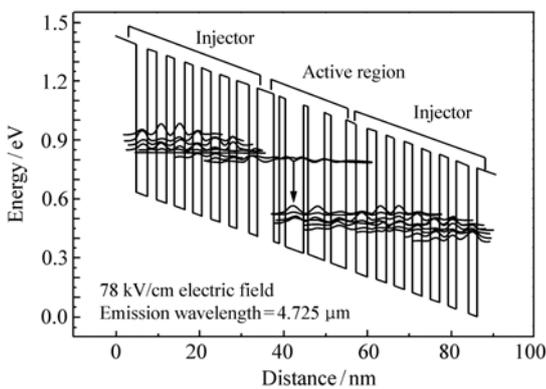


图3 四阱双声子共振设计示意图

Fig. 3 Diagram of conduction band for four quantum wells and two phonon resonance design

的几率大大降低。如图3所示,激光波长为 $4.8\ \mu\text{m}$ ,所施加的电场为 $78\ \text{kV}/\text{cm}$ ,工作温度为 $323\ \text{K}$ ,注入区宽度依次为 $2.88/1.8, 2.58/1.9, 2.29/2.0, 2.19/2.2, 2.09/2.2, 1.86/2.9$ 和 $1.86/4.0\ \text{nm}$ 。有源区的宽度依次为 $1.26/1.34, 4.0/1.3, 3.87/1.4$ 和 $3.72/2.3\ \text{nm}$ 。注入区Si的掺杂浓度为 $23 \times 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ ,室温连续输出功率为 $370\ \text{mW}$ 。

### 4.2 非共振抽取式设计

非共振抽取式设计是高功率短波长QCL的设计方案之一。双声子共振的设计具有较低的下能级粒子数,其由器件发热引起的载流子回注(Carrier thermal back filling)较低。但当双声子共振设计的条件都满足时,由于有源区的结构已固定,几乎没有其他参数可优化。能级5和能级4之间的能级差很难增加,注入到下一状态的寄生电流较难抑制。在不牺牲能级2的抽运效率的同时,哈佛大学F. Capasso课题组打破了沿用几年的双声子共振设计方案,提出如下设计:

$$\frac{1}{\tau_i} = \sum_j \frac{1}{\tau_{ij}} \quad (7)$$

根据能级寿命的计算公式(7),在能级2之下又增加了一个能级1',进而增大了能级2和最

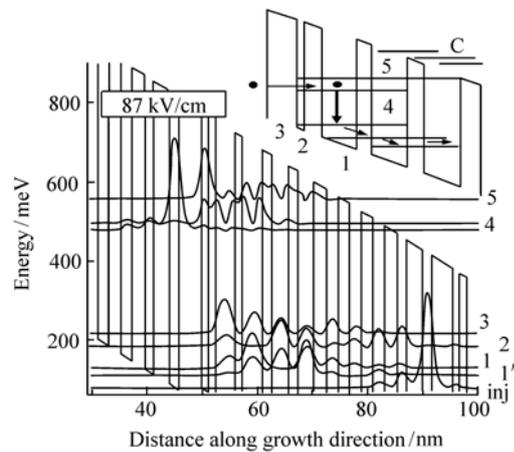


图4 用非共振抽取方式设计的导带能级示意图(五阱),激光波长为 $4.6\ \mu\text{m}$ 。插入的图片为双光子设计时载流子的运动趋势

Fig. 4 Diagram of conduction band for five quantum wells designed by nonresonant extraction method in emission wavelength at  $4.6\ \mu\text{m}$

低能级 1' 之间的能量差。能级 2 的波函数与能级 1 和能级 1' 的波函数之间有了较大的重叠。式 (7) 中分母也增加了一项能级寿命,使下能级 3 的寿命和双声子共振设计的寿命相近。该结构基于高 (1%) 应变补偿材料系  $\text{In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}/\text{Al}_{0.64}\text{In}_{0.36}\text{As}$ 。如图 4 所示,有源区为五阱结构,能级 2 的寿命  $\tau = 0.34 \text{ ps}$ ,能级差  $E_{21} = 55 \text{ meV}$ ,  $E_{21'} = 73 \text{ meV}$ ,偶极矩阵元  $Z_{43} = 1.48 \text{ nm}$ ,激励上能级 4 的寿命  $\tau = 1.77 \text{ ps}$ ,外加电场  $E = 87 \text{ kV/cm}$ 。采用应变补偿材料,激励波长为  $4.6 \text{ }\mu\text{m}$ 。与双声子共振设计相比,器件的工作特性和设计参数都有较大改善。在  $293 \text{ K}$  温度下,单侧输出光功率达  $3 \text{ W}$ ,其电光转换效率和阈值电流分别为  $12.7\%$  和  $0.86 \text{ kA/cm}^2$ 。该设计标志着短波长 QCL 进入高功率激光器的行列,并向实际应用迈出了关键的一步。

采用该设计方案的  $4.0 \text{ }\mu\text{m}$  激励波长的 QCL 也实现了超过  $2 \text{ W}$  的室温连续的输出<sup>[9]</sup>,在这之前  $4.0 \text{ }\mu\text{m}$  的最好结果约为  $500 \text{ mW}$ 。如图 5 所示,与  $4.6 \text{ }\mu\text{m}$  的设计相似,  $E_{54}, E_{31}, E_{3-\text{inj}}$  分别被设计成  $60, 100$  和  $135 \text{ meV}$ ,但是该设计有较大的能量差,较小的偶极矩阵元 ( $1.37 \text{ nm}$ ) 和较大的

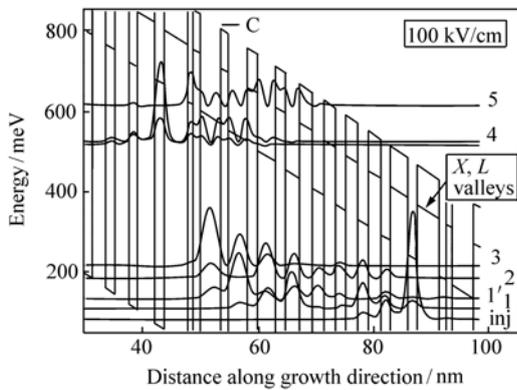


图 5 用非共振抽取式设计的  $\text{In}_{0.73}\text{Ga}_{0.27}\text{As}/\text{Al}_{0.71}\text{In}_{0.29}\text{As}$  材料系的 QCL 的导带示意图,激励波长为  $4.0 \text{ }\mu\text{m}$

Fig. 5 Diagram of conduction band for quantum cascade laser structure based on  $\text{In}_{0.73}\text{Ga}_{0.27}\text{As}/\text{Al}_{0.71}\text{In}_{0.29}\text{As}$  composition, designed by nonresonant extraction principle in emission wavelength at  $4.0 \text{ }\mu\text{m}$

上能级寿命 ( $2.2 \text{ ps}$ ),而器件增益量  $z_{43}^2\tau_4$  几乎一致。上能级和连续体之间的能量差  $E_{c4}$  由  $230 \text{ meV}$  增加到  $280 \text{ meV}$ 。该激光器采用  $\text{AlInAs}/\text{InGaAs}/\text{InP}$  材料系应变补偿量子阱结构,器件由 MBE 法生长,加工成掩埋型异质结结构,采用风冷系统,前端镀增透膜,后端镀高反膜,得到  $2 \text{ W}$  的连续输出,最大的电光转换效率为  $5\%$ 。

### 4.3 超强耦合设计

耦合强度被定义为器件在外电场的作用下,处于共振状态时,注入区最低能级和上能级之间的能量差的  $1/2$ 。耦合强度决定了隧穿速率,而较快的隧穿速率是得到理想的电光转换效率、工作电流密度、内部效率和器件增益的保障。基于这一概念的“超强耦合”设计,实现了  $160 \text{ K}$  或更低温度下  $40\% \sim 50\%$  的电光转换效率。在实际的材料生长中,相邻层间的表面并不光滑,粗糙度在原子级别,和层厚几乎相近,而且在 InP 基的  $\text{InGaAs}/\text{AlInAs}/\text{InP}$  材料系里,材料间界面的粗糙度相互不关联,相邻层厚的变化也不关联,这就导致了共振失谐。为了增大增益和降低传输时间,提高耦合强度是一个强有力的方案。如图 6 所示,外加电场为  $102 \text{ kV/cm}$ 。从最宽的势阱开始依次层厚为  $4.2/1.2/3.9/1.4/3.3/2.3/2.8/2.6/2.2/2.1/1.8/1.8/1.5/1.3/1.2/1.0$  (nm),这里用黑体字表示  $\text{InAlAs}$  势垒,明体表示  $\text{InGaAs}$  势阱,下划线为掺杂  $2.3 \times 10^{17}/\text{cm}^2$  的区域,中间粗虚线区域为超强耦合区域,两者之间约有  $19 \text{ meV}$  的

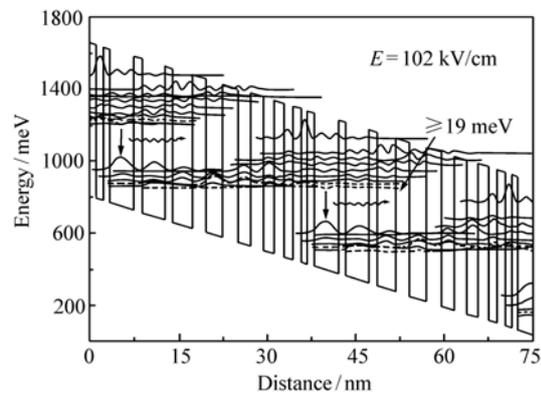


图 6 超强耦合导带示意图

Fig. 6 Diagram of conduction band for strong coupling design

能量差,计算耦合强度为 10 meV(普通的设计一般为 2~4 meV)。该设计采用了一个较窄的注入区势垒(1 nm,一般为 3~4 nm),降低了共振失谐,增强了共振隧穿效应。当外加电场发生改变,上能级和注入区之间的对齐效果更加稳定。而且由于薄的注入区势垒的引进,上能级波函数向注入区有更大的伸展,使得跃迁更类似于倾斜式而非垂直式,从而有效增大了上能级的寿命和斜率效率,降低了阈值电流。在 80 K 得到最佳脉冲工作下的电光转换效率为 47%,9 K 为 48%,在总功率中考虑引线电阻的影响时,电光转换效率为 50% 以上。即使在 200 K,其电光转换效率也可达到 35%。

#### 4.4 深阱和浅阱设计

高有源区温度对器件的工作影响极大。器件的阈值电流和斜率效率随着温度的升高呈指数下降,这种特性可由器件的特征温度来表征,特征温度越高,器件对温度的敏感度越低。深阱和浅阱设计方案可以提高 QCL 的特征温度,这为实现室温下的电光转换效率达到 50% 提供了可能。

通常的器件设计中,势垒和势阱的材料成分都是固定的,而深阱设计却分别采用了不同组分的势阱与势垒材料。设计的激光波长为 4.8  $\mu\text{m}$ ,其注入区采用了同 5.4  $\mu\text{m}$  激光波长相同的设计,材料组成为  $\text{In}_{0.60}\text{Ga}_{0.40}\text{As}/\text{Al}_{0.56}\text{In}_{0.44}\text{As}$  的超

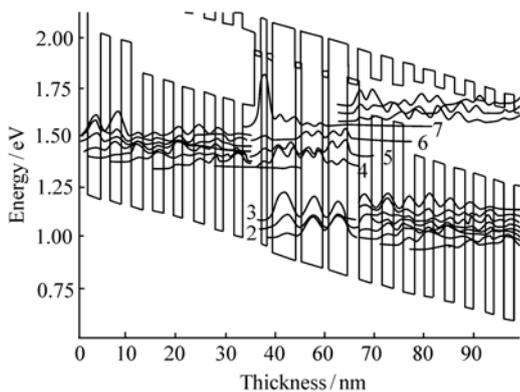


图7 深阱 QCL 在外加电场为 75 kV/cm 时(波长为 4.8  $\mu\text{m}$ )的导带示意图

Fig. 7 Diagram of conduction band for deep well QCL at electric field of 75 kV/cm in emission wavelength at 4.8  $\mu\text{m}$

晶格结构,而有源区的势阱所采用的材料为  $\text{In}_{0.68}\text{Ga}_{0.32}\text{As}$ ,相对于注入区的势阱,有源区的势阱较深。在有源区内或者周围势垒的组成为  $\text{Al}_{0.75}\text{In}_{0.25}\text{As}$ ,与传统设计相比,该设计的势垒更高,如图 7 所示,一个周期的有源区层厚为:2.2, [2.7], [1.9], [2.4], [1.9], [2.3], 2.0, 2.1, 2.0, 2.0, 2.2, 1.8, 2.3, 1.7, 2.3, 1.7, 2.4, 1.2, 1.4, **1.1**, **4.6**, **1.1**, **4.2**, 1.2, 3.8 nm, 其中黑体字为  $\text{In}_{0.60}\text{Ga}_{0.40}\text{As}$  量子阱,黑斜体字为  $\text{Al}_{0.75}\text{In}_{0.25}\text{As}$  势垒,明体字为  $\text{In}_{0.60}\text{Ga}_{0.40}\text{As}$  量子阱。器件包含 30 个周期,在 75 kV/cm 的外加电场下,偶极矩阵元为 1.45 nm,上、下能级寿命分别为 1.35 和 0.27 ps。上能级和连续体之间的能量差由 200 meV 上升至 450 meV,这使得上能级向连续体的散射可以忽略不计,器件的注入效率达到 95%。该设计本身抑制了载流子向连续体部分的泄露,器件的特征温度  $T_0$  和  $T_1$  在 20~60  $^{\circ}\text{C}$  的工作状态下可达到 238 K,此时温度对器件的阈值电流  $J_{\text{th}}$  和斜率效率的影响仅为传统激光器的 1/2。这种设计极大地改进了器件连续工作时的效率。

相对深阱设计,另一种显著提高特征温度的设计方案是浅阱设计,该设计得到了室温工作下的最大化特征温度,  $T_0$  为 383 K,  $T_1$  为 645 K,单一腔面室温连续输出为 3 W,电光转换效率达到 16%。在室温下,器件的斜率效率可达 4.34 W/A,脉冲的电光转换效率达到 20%,是目前已见报道的最高值。激光下能级和上个周期注入区的最低能级的能量差为 180 meV。采用晶格匹配的材料来减少载流子向其它能级的泄露。如图 8 所示,设计波长为 4.8  $\mu\text{m}$ ,梳状的导带结构是在  $\text{In}_{0.69}\text{Ga}_{0.31}\text{As}/\text{Al}_{0.64}\text{In}_{0.3}\text{As}$  材料系中插入了近似晶格匹配的  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$  材料。从注入区的势垒开始,有源区的层厚依次为, **3.2**, (1.4), (1.8), 3.8, **1.6**, 3.5, [**0.6**, **0.58**, **0.6**], **2.9**, [**0.4**, **0.58**, **0.4**], 2.6, [**0.45**, **0.58**, **0.45**], **2.3**, [**0.5**, **0.58**, **0.5**], **2.2**, [**0.6**, **0.58**, **0.6**], 2.2, [**0.6**, **0.58**, **0.6**], 2.0, [**0.86**, **0.58**, **0.86**] nm,这里黑体字表示势垒,明体表示势阱,晶格匹配的材料在小括号内,中括号内为混合的势垒,加下划线的区域是掺杂区域。

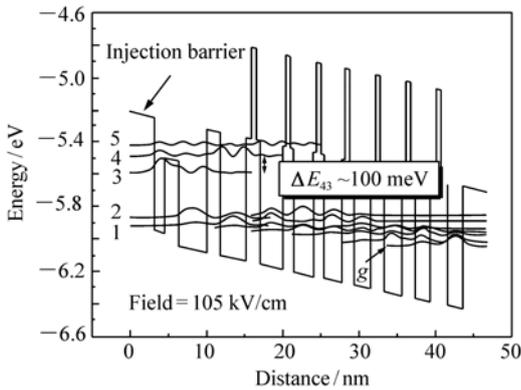


图 8 浅阱设计的导带和波函数的示意图

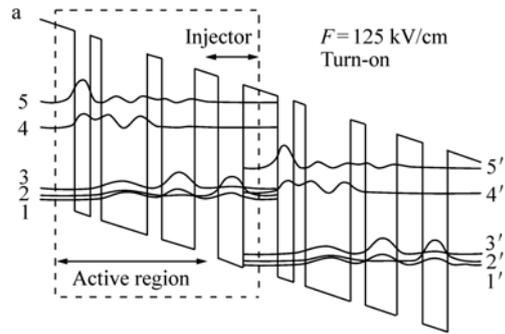
Fig.8 Diagram of band and wavefunction for shallow well design

导致低特征温度的主要机制是 LO 声子从能级 3 到能级 4 的散射,假设此时的粒子分布为波尔兹曼分布,散射时间  $\tau_{34}$  正比于  $\exp[(\Delta E_{43} - \hbar\omega_{LO})/kT]$ ,由于双声子共振的设计方案中  $E_{43}$  的值仅为 46 meV,所以载流子的泄露至少降低为原来的 1/5。该设计同时也降低了激射过程中由界面粗糙度引起的散射。由于界面间的散射速率正比于界面处波函数所确定的能量差,有源区的第一个势阱和势垒有较大大程度上的重叠,此时用小的能带差的材料进行替换,便可降低界面间的散射。

#### 4.5 短注入区设计

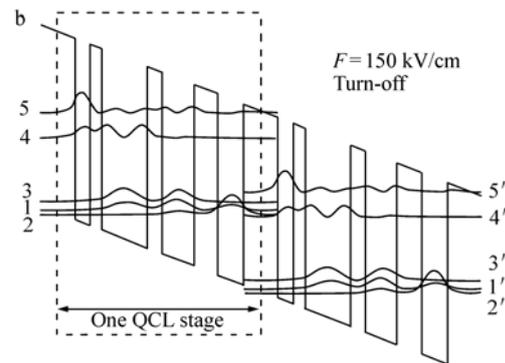
对任何一种半导体激光器而言,电光转换效率都是衡量器件性能的最重要参数。尽管内部微分量子效率<sup>[28-29]</sup>在低温时可设计成大于 80%,但由于器件本身的自热效应,QCL 的电光转换效率在任何工作温度下都没有突破 50%。美国西北大学量子器件中心采用了单阱的注入区设计,得到波长为 5  $\mu\text{m}$  的器件在 40 K 的工作条件下达到 53% 的电光转换效率。该设计首次实现 QCL 的输出功率大于热损耗。

单阱注入区的有源区设计用于实现在开启电压区域和夹断电压区域内同时具有高的内部微分量子效率和较低的失谐电压。如图 9 所示,设计温度为 80 K,有源区由 3 个量子阱组成,激射发生在能级 4 和能级 3,从注入区的势垒开始从左至右层厚依次为 **3.8**, **1.6**, **1.3**, **4.9**, **1.6**, **3.4**, **2.7**, **2.7** nm,这里黑体字表示势垒,加下划线的区



(a) 开启电压的模拟示意图

(a) Simulation performed at turn-on conditions



(b) 夹断电压的模拟示意图

(b) Simulation performed at turn-off conditions

图 9 单阱注入区的导带和波函数的示意图

Fig.9 Diagram of conduction band and wavefunction for single-well injector design

域为掺杂区域。特征是光学传输略带斜跃迁的方式,采用单一 LO 声子的共振机制,能级 3 和能级 4 之间的能级寿命分别为 2.17 ps 和 0.44 ps,能级 3 和能级 4 之间的传输时间为 6.76 ps,内部微分量子效率为 82%。一个较高内部微分量子效率的有源区的优势会被一个差载流子的传输过程减弱。在空间上,注入区的能级(能级 2)夹在有源区的两个能级之间;在能量上,随着外加电场的增加,能级 2 来回穿过声子的共振能级 1 和能级 3。而当能级 4' 刚刚跨过能级 3 时,能级 2 刚好位于能级 1 和能级 4',在这个电场下,在能级 1 处被加速的载流子,被热激发到能级 2,能级 2 起到一个桥接的作用。能级 4' 可以通过共振隧穿得到大量电子,它有效地形成了一种热“前注入”的机制,该机制有利于对粒子数反转和载流子的传输。较高的微分量子效率和优良的载流子传输机制必然会得到一个较为理想的斜率效率。

## 5 结 论

本文研究了高功率短波长量子级联激光器的设计原理和方法,分析和讨论结果认为,要得到高性能的器件主要应考虑以下因素:(1)器件应具有高的工作效率,即高电光转换效率,低的界面粗糙度,更优的传输机制,以最少的输入功率得到较高的整体输出水平;(2)器件有源区的设计应有较低的温度敏感性。较高的有源区的温度对QCL本身的工作具有极大的影响,会导致较高的阈值电流,较低的斜率效率,较低的最大输出光功率和电光转换效率,因此设计应从提高注入效率,

减少电子热回流,提高特征温度等条件入手来降低器件本身对温度的敏感性;(3)要特别关注器件加工中的热处理的技术<sup>[7,11]</sup>,这是室温下高功率、高效率、短波长 QCL 发展的基础。

除了传感应用外,高功率,短波长(3~5 μm) QCL 的最重要应用是保护飞行器的安全,如在导弹的红外对抗技术中的应用,这是各国大力发展该波段 QCL 的主要原因。如今涌现的各种有源区先进设计技术为其成为中红外不可替代的光源奠定了重要基础,其先进的设计方案可成为其它波段(红外与 THz 波段) QCL 实现室温高功率能带设计的借鉴。

### 参考文献:

- [1] FAIST J, CAPASSO F, SIVCO D L, *et al.*. Quantum cascade laser[J]. *Science*, 1994, 264:553.
- [2] GMACHL C, CAPASSO F, SIVCO D L, *et al.*. Recent progress in quantum cascade lasers and applications[J]. *Rep. Prog. Phys.*, 2001, 64:1553-1601.
- [3] MASSELINK W T, SEMTSIV M P. Quantum-cascade lasers with emission wavelength 3~5 μm[J]. *SPIE*, 2010, 7836: 78360U.
- [4] LYAKH A, PFLÜGL C, DIEHL L, *et al.*. 1.6 W high wall plug efficiency, continuous-wave room temperature quantum cascade laser emitting at 4.6 μm[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 92:111110.
- [5] LYAKH A, MAULINI R, PFL G L C, *et al.*. 3 W continuous-wave room temperature single-facet emission from quantum cascade lasers based on nonresonant extraction design approach[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 95:141113.
- [6] SLIVKEN S, BAI Y, GOKDEN B, *et al.*. Current status and potential of high power mid-infrared intersubband lasers[J]. *SPIE*, 2010, 7608:76080B.
- [7] EVANS A, DARVISH S R, SLIVKEN S, *et al.*. Buried heterostructure quantum cascade lasers with high continuous-wave wall plug efficiency[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 91:071101.
- [9] LYAKH A, MAULINI R, TSEKOUN A, *et al.*. High-performance continuous-wave room temperature 4.0 μm quantum cascade lasers with single-facet optical emission exceeding 2 W[J]. *Proc. of the National Academy of Sciences, USA*, 2010, 107(44):18799-18802.
- [10] CAPASSO F. High-performance midinfrared quantum cascade Lasers[J]. *Opt. Eng.*, 2010, 49(11):111102.
- [11] TSEKOUN A, GO R, PUSHKARSKY M, *et al.*. Improved performance of quantum cascade lasers via manufacturable quality epitaxial side down mounting process utilizing aluminum nitride heat sinks[J]. *SPIE*, 2006, 6127:612702.
- [12] LIU P Q, HOFFMAN A J, ESCARRA M D, *et al.*. Highly power-efficient quantum cascade lasers[J]. *Nature Photonics*, 2009, 10:1038:95-98.
- [13] HURGIN K, *et al.*. Role of interface roughness in the transport and lasing characteristics of quantum-cascade lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 94:091101.
- [14] SHIN J C, SOUZA M D, LIU Z, *et al.*. Highly temperature insensitive, deep-well 4.8 μm emitting quantum cascade semiconductor lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 94:201103.
- [15] BAI Y, TSAO N S, SELCUK E, *et al.*. Highly temperature insensitive quantum cascade lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 97:251104.
- [16] BOTEZ D, SHIN J C, KUMAR S, *et al.*. Electron leakage and its suppression via deep-well structures in 4.5 to 5.0 μm emitting quantum cascade lasers[J]. *Opt. Eng.*, 2010, 49(11):111108.

- [17] BAI Y B, SLIVKEN S, KUBOYA S, *et al.*. Quantum cascade lasers that emit more light than heat[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4:99-102.
- [18] FRANZ K J, LIU P Q, RAFTERY J J J, *et al.*. Short injector quantum cascade lasers[J]. *IEEE, J. Quantum. Elect.*, 2010, 46(5):591-600.
- [19] WANKE M C, CAPASSO F, GMACHL C, *et al.*. Injectorless quantum cascade lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, 78:3950-3952.
- [20] KATZ S, FRIEDRICH A, BOEHM G, *et al.*. Continuous wave operation of injectorless quantum cascade lasers at low temperatures[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 92:181103.
- [21] SIRTORI C, CAPASSO F, FAIST J, *et al.*. Nonparabolicity and a sum rule associated with bound-to-bound and bound-to-continuum intersubband transitions in quantum wells[J]. *Phys. Rev. B.*, 1994, 50:8663-8674.
- [22] NELSON D F, MILLER R C, KLEINMANN D A. Band nonparabolicity effects in semiconductor quantum wells[J]. *Phys. Rev. B.*, 1987, 35:7770-7773.
- [23] VAN D E WALLE C G. Band lineups and deformation potentials in the model-solid theory[J]. *Phys. Rev. B.*, 1989, 39:1871-1883.
- [24] ALARELLI M. *Heterojunctions and Semiconductor Heterostructure*[M]. Berlin:Springer-Verlag, 1986.
- [25] FERREIRA R, BASTARD G. Evaluation of some scattering times for electrons in unbiased and biased single- and multiple-quantum-well structures[J]. *Phys. Rev. B.*, 1989, 40:1074-1086.
- [26] LIU H C, CAPASSO F. *Intersubband Transitions in Quantum Wells: Physics and Device Applications II*[M]. San Diego: Academic Press, 2000.
- [27] BECK M, HOFSTETTER D, AELLEN T, *et al.*. Room temperature quantum cascade laser[J]. *Science*, 2002, 295:301-305.
- [28] RAZEGHI M. High performance InP based mid-IR quantum cascade lasers[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Elect.*, 2009, 15:941-951.
- [29] FAIST J. Wallplug efficiency of quantum cascade lasers: critical parameters and fundamental limits[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 90:253512.

作者简介:王 琪(1986—),女,黑龙江虎林人,硕士研究生,主要从事高功率量子级联激光器的工艺与设计方面的研究。

E-mail:wq2008ciomp@163.com