

## InP 基近红外波段量子线激光器的温度特性研究\*

杨新荣<sup>1)†</sup> 徐波<sup>2)</sup> 赵国晴<sup>1)</sup> 申晓志<sup>1)</sup> 史淑惠<sup>1)</sup> 李洁<sup>1)</sup> 王占国<sup>2)</sup>

1) (邯郸学院物理与电气工程系, 河北 056005)

2) (中国科学院半导体研究所, 半导体材料重点实验室, 北京 100083)

(2012年4月6日收到; 2012年5月11日收到修改稿)

制备了 InP 基近红外波段量子线激光器, 在激光器温度特性分析中, 观察到了反常的特征温度分布曲线. 随着热沉温度增加, 在 120—180 K 时, 激光器阈值电流随温度升高出现下降趋势, 即出现了负的特征温度. 分析认为负特征温度的出现是由于随温度变化载流子再分布引起的.

**关键词:** 量子线, 激光器, 特征温度

**PACS:** 68.65.Hb, 68.65.La, 68.37.Ps

## 1 引言

自组织量子点(线)体系因其优越的光电性质而成为目前的研究热点. 理论预计, 自组织量子点(线)激光器具有比传统的量子阱激光器更稳定的温度特性、更高的增益以及更小的阈值电流等诸多优点<sup>[1,2]</sup>. 人们已经利用高失配的(Ga)InAs/GaAs系统(晶格失配为7%)制成了新型的量子点激光器和探测器<sup>[3-5]</sup>. 同样, 为了实现长波长(发光波长1.55 μm)激光器, 低失配的InAs/InP系统(晶格失配3%)也引起了人们广泛的兴趣<sup>[6,7]</sup>. 2003年, Paranthoen等<sup>[8]</sup>在InP(311)B衬底上, 以InAlGaAs作为波导层和势垒层, 实现了InAs量子点激光器室温基态激射, 波长1.52 μm. 文献<sup>[9-12]</sup>在InP(100)衬底上以InAlGaAs作为波导层, InAlAs作为缓冲层, InAs量子短线作为有源区, 实现了室温激射, 波长范围为1.54—1.78 μm. Jin等<sup>[13]</sup>在InP(100)面以InAlGaAs作波导层, InAlAs作缓冲层, InAs量子点激光器室温激射波长为1.562 μm, 200 K以下特征温度为377 K. 从目前的研究看InAs/InP体系比较复杂, 生长条件的变化

和不同的器件结构对器件特性的影响非常明显. 因此对InAs/InP体系材料的生长和器件结构都需要做进一步的研究, 以提高各项性能, 达到实用化的目的. 本文主要对InAs/InP量子线激光器连续激射时的温度稳定性进行了研究, 并对其独特的特征温度进行了分析.

## 2 实验

激光器基本结构如表1所示. 激光器样品是在Gen II型固源分子束外延系统中生长. 衬底采用国产的掺Fe半绝缘InP(100)衬底. 生长过程中钼托高速旋转以增加样品生长的均匀性. 具体生长过程如下: 首先在590 °C下脱去衬底氧化层, 然后分别生长100 nm晶格匹配(300 K下晶格失配在 $10^{-4}$ 左右)的n-In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As缓冲层和160 nm的InGaAlAs波导层, 再淀积10个周期InAs/InGaAlAs有源区, 其中包括4.5 ML的InAs, 20 nm的InGaAlAs; 然后生长上波导层和p-InAlAs上光限制层; 最后生长260 nm的p-InGaAs接触层. 生长温度对InAlAs层为510 °C, InGaAlAs层和InAs为500 °C. 我们采用的是梯度折射率包层, 光和载

\* 国家自然科学基金(批准号: 60990315)、国家重点基础研究发展计划(批准号: 2006CB604904)、河北省科学技术研究与发展指导项目(批准号: Z2010112)和河北省科技支撑计划项目(批准号: 10213936)资助的课题.

† E-mail: yangxr1976@126.com

流子分别为限制型 (GRIN-SCH) 结构, 这种结构具有波导效应, 能够控制光场的扩展, 提高光模限制因子, 明显使阈值电流降低<sup>[14]</sup>. 激光器二极管被制作成脊宽 22 μm、腔长 5 mm 的宽面积边发射激光器.

表 1 激光器基本结构

材料	厚度	每层作用
InGaAs	p <sup>+</sup> 260 nm	接触层
InAlAs	p <sup>+</sup> 2000 nm	上限制层
InGaAlAs	140 nm	上波导层
InGaAlAs	20 nm	10 层有源区
InAs × 25	0.18 × 25 = 4.5 ML	
InGaAlAs	160 nm	下波导层
InAlAs	n <sup>+</sup> 100 nm	下限制层
InP(100)	n <sup>+</sup> 衬底	衬底

### 3 结果及分析

图 1 为腔长 5 mm 沿 [110] 方向激光器 (以下简称激光器) 在连续工作时不同温度下的功率电流曲线. 图 2 为不同电流下激光器室温激光谱, 由图 2 可见激光器为基态激射. 阈值电流随温度变化曲线如图 3 所示. 图 3 中的特征温度  $T_0$  按照如下公式确定:

$$I_{th} = I_0 \exp(T/T_0), \quad (1)$$

其中  $I_{th}$  为激光器阈值电流,  $T$  为激光器工作温度,  $I_0$  为一特定参考阈值电流. 从图中可看到, 当热沉温度从 82 K 升高到 300 K 时, 激光器的阈值电流增加了几乎 7 倍. 在所测温度范围内, 特征温度分为三个区域. 温度范围 82—120 K 的 I 区, 阈值电流随温度变化不大. 这个温度范围内, 激光器的特征温度高达 840 K, 与理论预计的量子线 (点) 激光器高的温度稳定性相一致, 显示了量子线 (点) 激光器的优越性. 在 120 K 到 180 K 的 II 区, 随着热沉温度增加, 阈值电流随温度变化出现下降趋势, 即负的特征温度. 热沉温度进一步增加, 在图示 III 区, 激光器阈值电流又一次开始上升, 并在 220 K 以上迅速增加. 器件特征温度明显降低, 器件性能变差. 这与载流子泄露和非辐射复合中心的热激活有关. 在半导体激光器中, 随着热沉温度的升高, 载流子将占据高能级态, 同时逃逸到垒层材料中的几率也

增大了, 特定能量的载流子密度也会降低, 从而导致阈值电流上升. 其次, 高温时, 势垒层中非辐射复合中心被激活, 引起非辐射复合, 也会引起阈值电流增加.

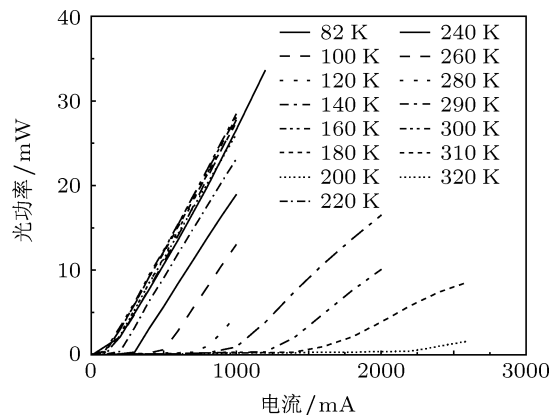


图 1 不同温度下激光器连续工作功率电流曲线

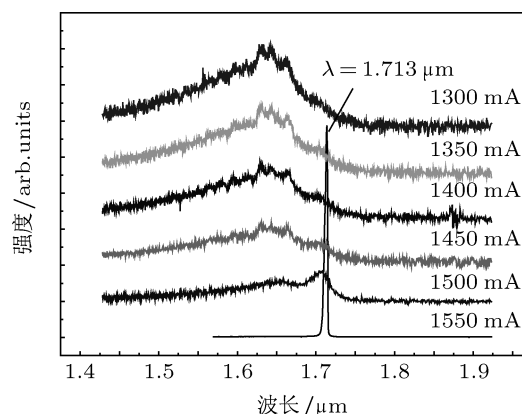


图 2 不同电流下激光器室温连续激光谱

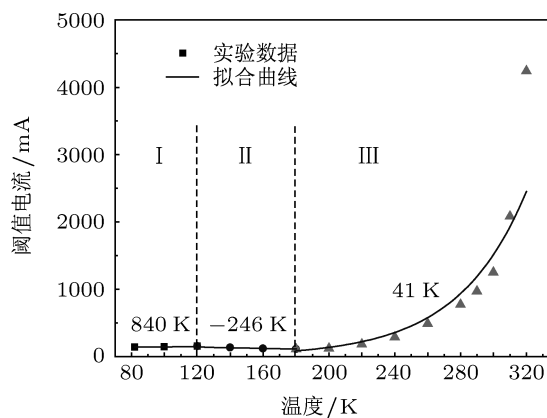


图 3 腔长 5 mm, 沿 [-110] 方向激光器阈值电流随温度变化曲线

半导体内载流子的分布毫无疑问是受到温度

影响的,在量子线(点)中,这种影响可能会更加显著.因为量子线(点)系统不同于体材料和量子阱,它由分裂的束缚能级以及准连续的浸润层构成.量子线(点)间距一般较大,不同量子线(点)之间很难通过隧穿效应发生联系,载流子的分布强烈依赖于各量子线(点)与浸润层之间的相互作用,而温度因素对于束缚能级与浸润层之间的作用(包括载流子的热激发与捕获)来说是至关重要的.

在低温下,载流子一旦落入量子线(点)中将很难克服势垒作用而逃逸出去.因而,量子线(点)中的载流子数目仅取决于其捕获几率.我们通常把此时的载流子分布称为非平衡分布<sup>[15]</sup>,即图2中的I区.而在温度较高时,捕获进量子点的载流子通过热激发回到浸润层的概率大大提高,不同量子点可以充分通过浸润层实现载流子的交换,进而达到与体材料类似的热平衡<sup>[15]</sup>.通常,我们分别用电子和空穴的准费米能级来描述此时的载流子分布情况,并称之为平衡分布,对应图3中的III区.我们知道载流子从一种分布到另一种分布是一个渐变的过程.随温度升高,载流子从I区的非平衡分布状态向III区平衡分布状态转变时必然存在一过渡区,这与图3中的II区相对应,即II区中载流子分布处于过渡状态.

图3所示I区,温度在82—120 K范围内,载流子属于非平衡分布的情况.这时各个量子线由于和浸润层之间缺乏载流子交换,不同量子线之间几乎互相隔绝.此时,量子线的能级占据概率仅由其捕获载流子的概率决定.而一般来说,不同尺寸的量子线在捕获载流子的机会上并无特别的差异.因而非平衡分布的特点就是在不同量子线的相同能态上,载流子具有相同的占据概率.也就是说非平衡条件下载流子的填充与温度无关,因此,此时量子线激光器的阈值电流应该对温度不敏感.

图3所示II区,即载流子从非平衡分布到平衡分布的过渡区.这一温度范围内,载流子逐渐由非平衡分布转变为平衡分布.此过程中,阈值电流随温度的变化出现了反常的下降现象,根据(1)式,这

对应于负的特征温度.由上面的分析我们知道,在非平衡情况下,载流子机会均等的分布到各能量的量子线(点)中,任何能量的量子线(点)相对于其他量子线(点)都没有优势.此时非平衡分布的增益峰值可能比平衡分布的要小,导致从非平衡到平衡转变时阈值电流反而下降<sup>[15]</sup>.

图3所示III区,属于载流子平衡分布区.捕获进量子线(点)的载流子可以通过热激发重新回到浸润层,通过浸润层这一媒介可实现载流子的交换.即在平衡分布范围内,大量的载流子通过浸润层隧穿到了具有高能级的量子线中,使得激光器有源区的反转因子远低于非平衡分布条件下的值,从而造成在相同注入条件下,平衡分布时的增益谱峰值要比非平衡时小得多.因此,激光器阈值电流相应增加,特别是当阈值水平从一个能级跳变到另一个能级的时候,阈值电流的增加非常明显.

## 4 结论

对InP基InAs量子线激光器的温度稳定性进行了分析.特征温度分为三区:82—100 K为I区,120—180 K为II区,180 K以上为III区. I区激光器的特征温度高达840 K,与理论预计的量子线(点)激光器高的温度稳定性相一致.理论分析认为低温时,有源区量子线中载流子分布处于非平衡分布状态,而非平衡条件下载流子的填充与温度无关.因此,此时量子线激光器的阈值电流应该对温度不敏感. II区处于过渡区,其特征温度表现为负值,负的特征温度是由于非平衡分布的增益峰值可能比平衡分布的要小,导致从非平衡到平衡转变时阈值电流反而下降. III区即载流子平衡分布区,大量的载流子通过浸润层隧穿到了具有高能级的量子线中,从而使激光器有源区在平衡分布时的增益谱峰值要比非平衡时小得多.因此,阈值电流相应地增加,特别是当阈值水平从一个能级跳变到另一个能级的时候,阈值电流的增加非常明显.

- [1] Arakawa Y, Sakaki H 1982 *Appl. Phys. Lett.* **40** 939  
 [2] Asada M, Miyamoto Y, Suematsu Y 1986 *IEEE J. Quantum Electron.* **32** 1915  
 [3] Ledentsov N N, Shchukin V A, Grundmann M, Kirstaedter N, Böhrer J, Schmidt O, Bimberg D, Ustinov V M, Egorov A, Yu,

- Zhukov A E, Kop'ev P S, Zaitsev S V, Gordeev N Yu, Alferov Zh I, Borovkov A I, Kosogov A O, Ruvimov S S, Werner P, Gösele U, Heydenreich J 1996 *Phys. Rev. B* **54** 8743  
 [4] Phillips J, Kamath K, Bhattacharya P 1998 *Appl. Phys. Lett.* **72** 2020

- [5] Pan D, Towe E, Kennerly S 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 1937
- [6] Lambert B, Le Corre A, Drouot V, Haridon H L, Loualiche S 1998 *Semicond. Sci. Technol.* **13** 143
- [7] Carlsson N, Junno T, Montelius L, Pistol E, Samuelson L, Seifert W 1998 *J. Cryst. Growth*, **191** 347
- [8] Paranthoen C, Platz C, Moreau G, Bertru N, Dchaese O, Le Corre A, Miska P, Even J, Folliot H, Labbe C, Patriarche G, Simon J C, Loualiche S 2003 *J. Crystal. Growth* **251** 230
- [9] Wang R H, Stintz A, Varangis P M, Newell T C, Li H, Malloy K I, Laster L F 2001 *IEE Photon. Technol. Lett.* **13** 767
- [10] Schwertberger R, Gold D, Reithmaier J P, Forchel A 2002 *IEE Photon. Technol. Lett.* **14** 735
- [11] Schwertberger R, Gold D, Reithmaier J P, Forchel A 2003 *J. Cryst. Growth* **251** 248
- [12] Allen C N, Poole P J, Marshall P, Fraser J, Raymond S, Fafard S 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 3629
- [13] Jin S K, Jin H L, Sung U H, Won S H, Kwack H S, Chul W L, Dae K O 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 1033
- [14] Jiang J P 2000 *Semiconductor laser* (1st Edn.) (Beijing: Electronic Industries Press) pp320–330 (in Chinese) [江剑平 2000 半导体激光器 (电子工业出版社) 第 320—330 页]
- [15] Deng S L 2005 *Master's Dissertation* (Beijing: Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [邓盛凌 2005 硕士学位论文 (北京: 中科院半导体所)]

## Investigation of the temperature sensitivity of the long-wavelength InP-based laser\*

Yang Xin-Rong<sup>1)†</sup> Xu Bo<sup>2)</sup> Zhao Guo-Qing<sup>1)</sup> Shen Xiao-Zhi<sup>1)</sup>  
Shi Shu-Hui<sup>1)</sup> Li Jie<sup>1)</sup> Wang Zhan-Guo<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> (Department of Physics and Electronic Engineering, Handan College, Handan 056005, China)

<sup>2)</sup> (Key Laboratory of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(Received 6 April 2012; revised manuscript received 11 May 2012)

### Abstract

The long-wavelength laser on InP (001) is fabricated, the temperature dependence of threshold current density is investigated. The nomalous decrescence of threshold current density is observed with the increase of temperature, which leads to a negative characteristic temperature. The origin of this phenomenon is discussed. We attribute the anomalous temperature dependence of threshold current density to the carrier redistribution effect.

**Keywords:** quantum wires, laser, characteristic temperature

**PACS:** 68.65.Hb, 68.65.La, 68.37.Ps

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60990315), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2006CB604904), the Science and Technology Research and Development Project of Hebei Province, China (Grant No. Z2010112) and the Science and Technology Support Program of Hebei Province, China (Grant No. 10213936).

† E-mail: yangxr1976@126.com