

2 μm 半导体激光器有源区量子阱数的优化设计

安 宁, 刘国军, 李占国, 李 辉, 席文星, 魏志鹏, 马晓辉

(长春理工大学 高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘 要: 利用 LASTIP 软件理论分析了有源区量子阱数目对不同组分的 InGaAsSb/AlGaAsSb 2 μm 半导体激光器能带、电子与空穴浓度分布以及辐射复合率等性能参数的影响。研究表明:量子阱的个数是影响激光器件性能的关键参数,需要综合分析和优化。量子阱数太少时,量子阱对电子束缚能力弱,电子在 p 层中泄漏明显,辐射复合率低。量子阱数过多时,载流子在阱内分配不均匀,p 型层中电子浓度升高,器件内损耗加大,辐射复合率下降。结合对外延材料质量的分析,InGaAsSb/AlGaAsSb 半导体激光器有源区最优量子阱数目为 2~3。该研究结果可合理地解释已有实验报道,并为 2 μm 半导体激光器结构设计提供理论依据。

关键词: 多量子阱激光器; 有源区量子阱数目; 数值模拟

中图分类号: TN243 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)07-1969-06

Optimization of the number of quantum wells in the active region for 2 μm laser diode

An Ning, Liu Guojun, Li Zhanguo, Li Hui, Xi Wenxing, Wei Zhipeng, Ma Xiaohui

(National Key Laboratory on High-power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to find the appropriate quantum well number, the electrical and optical characteristics of InGaAsSb/AlGaAsSb laser diode with various QW numbers and contents were investigated using LASTIP simulation program. In the case of single QW, the total number of carriers injected into the QW will be small and the radiative recombination will be poor. When the number of QWs was increased into larger than 4, however, the optical performance started to degrade because of the uneven distribution of carrier concentration and the higher electron concentration in the p-side, which increased in the internal loss in the active region. Taking into account of the effect of QWs number on the epitaxy layers quality, the optimized number of InGaAsSb/AlGaAsSb 2 μm LDs was 2-3. The obtained results are beneficial to the design of the high performance 2 μm Sb-containing LDs.

Key words: MQW laser; quantum well number in the active region; numerical simulation

收稿日期:2014-11-05; 修订日期:2014-12-10

基金项目:国家自然科学基金(61006039, 61370043)

作者简介:安宁(1988-),女,博士生,主要从事 III-V 族半导体材料及器件研。Email: anning4252@126.com

导师简介:刘国军(1964-),男,教授,博士,主要从事半导体光电子器件的研究。Email: gjliu626@126.com

0 引言

InGaAsSb/AlGaAsSb 多量子阱(MQW)激光器是 2~5 μm 波段的理想光源,在痕量气体检测、激光雷达、卫星遥感、医疗及自由空间等领域中表现出巨大的潜力^[1]。近年来,这一类半导体激光器的相关研究已取得了较大进展。2009 年,P. Barrios 等人研制了量子阱激光器 $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}_{0.14}\text{Sb}_{0.86}/\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}_{0.021}\text{Sb}_{0.979}$, 阈值电流仅为 45 mA^[2]。2013 年,Xu Yun 等人制备的 $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{Sb}/\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$ 双量子阱激光器室温连续输出功率达到 357 mW^[3]。同年,Zhang Tiancheng 等人利用 MBE 技术生长了 $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}_{0.12}\text{Sb}_{0.88}/\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$ 五量子阱激光器,输出波长为 2.34 μm ^[4]。

对于量子阱激光器,注入载流子经过包层后才可被量子阱收集,实现复合发光。若电子和空穴的平均自由程小于量子阱厚度,则注入载流子将扩展至包层并在该层内发生复合。单量子阱结构收集自由载流子的能力较差,而多量子阱结构由于隧道效应,可有效收集各个量子阱内的载流子,大大提高了总的载流子的数目和复合效率。但是,量子阱的个数不是越多越好,半导体激光器的光学性质和量子阱的个数并不成线性关系^[5]。另外,随着量子阱个数的增加,外延成长材料将超过临界厚度,阱层和垒层之间的应力累积会造成晶体质量下降,影响器件性能^[6]。

文中利用 Lastip (Laser Technology Integrated Program) 模拟了量子阱数量变化对 InGaAsSb/AlGaAsSb 半导体激光器性能的影响。通过研究载流子在多量子阱输运原理,讨论具有不同量子阱个数的半导体激光器的能带、电子与空穴浓度分布以及辐射复合率等性能参数的影响。最后结合对外延质量的分析,优化了有源区量子阱数目,对 2 μm InGaAsSb/AlGaAsSb 半导体激光器结构设计具有指导作用。

1 器件模拟基本方程

Lastip 软件作为一个强大的半导体激光器仿真软件,可以在 2D 的空间设计材料及结构属性,模拟半导体激光器的光学和电学行为。它是以泊松方程和电流连续方程为基础,进行半导体激光器各种性能的仿真。

$$-\nabla \cdot \left(\frac{\epsilon_0 \epsilon_{dc}}{q} \nabla V \right) = -n + p + N_D(1-f_D) - N_A f_A + \sum_j (N_j \delta_j - f_j) \quad (1)$$

$$\nabla \cdot J_n - \sum_j R_n^j - R_{sp} - R_{st} - R_{au} + G_{opt}(t) = \frac{\partial n}{\partial t} + N_D \frac{\partial f_D}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot J_p - \sum_j R_p^j + R_{sp} + R_{st} + R_{au} - G_{opt}(t) = \frac{\partial p}{\partial t} + N_D \frac{\partial f_D}{\partial t} \quad (3)$$

式中: R_{sp} 为自发辐射复合速率; R_{st} 代表受激辐射复合率; $G_{opt}(t)$ 代表光产生率; N_A, N_D 为浅层施主、受主掺杂密度; f_D, f_A 为电子占据施主和空穴占据受主的概率。

$$J_n = n \mu_n \nabla E_f \quad (4)$$

$$J_p = p \mu_p \nabla E_f \quad (5)$$

式中: n, p 分别为电子流和空穴流密度; μ 为载流子迁移率; E_f 为准费米能级。

$$R_n^j = c_{nj} n N_j (1-f_j) - c_{nj} n_j N_j f_j - G_m \quad (6)$$

$$R_p^j = c_{pj} p N_j f_j - c_{pj} p_j N_j (1-f_j) - G_m \quad (7)$$

公式(7)是第 i 个 Shockley-Read-Hall(SRH)深能级陷阱复合率; c_{nj}, c_{pj} 为载流子俘获系数; $n_j(p_j)$ 为电子或空穴准费米能级与 j 陷阱中 E_j 合并时的载流子浓度; f_j 为电子占据第 j 个深能级的概率。

$$R_{au} = (C_n n + C_p p)(np - n_i^2) \quad (8)$$

公式(8)为俄歇复合效率。其中, C_n, C_p 为材料的俄歇复合系数; n, p 为电子与空穴浓度; n_i 为本征载流子密度^[7]。

2 器件基本结构及软件模拟

文中的器件结构和部分参数的选取已经在参考文献[8]中报道过。器件的工作温度为 300 K,器件结构如图 1 所示。从下到上依次为:n-GaSb(掺 Te: $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$)衬底,0.1 μm 厚的 n-GaSb 缓冲层(掺 Te: $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$),1.2 μm 厚的 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}_{0.07}\text{Sb}_{0.93}$ n 型包层(掺 Te: $3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$),0.4 μm 厚非掺杂 $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$ 下波导层,n 个 10 nm/20 nm 的非掺杂 $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}/\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$ 量子阱有源区 ($n=1 \sim 5$),0.5 μm 厚非掺杂 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}_{0.03}\text{Sb}_{0.97}$ 上波导层,1.3 μm 厚的 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}_{0.08}\text{Sb}_{0.92}$ p 型包层(掺 Be: $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$),0.05 μm 厚的 GaSb 盖层(掺 Be: $2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$)。

图 2(a)为具有不同阱数 InGaAsSb/AlGaAsSb 半导体激光器各个阱内电子浓度分布情况。从图中可知:随着阱数的增多,进入到量子阱内的总载流子数

目增大。这与载流子在多量子阱的运输过程有关^[9] 如图 2(b)所示。由于量子阱捕获的时间很短,可以认为载流子首先全部被第一个阱捕获,随后载流子以两种方式进入第二个阱:

(1) 阱中载流子被热激发,到达垒层,然后以扩散的形式通过该层,再被第二个阱所捕获。

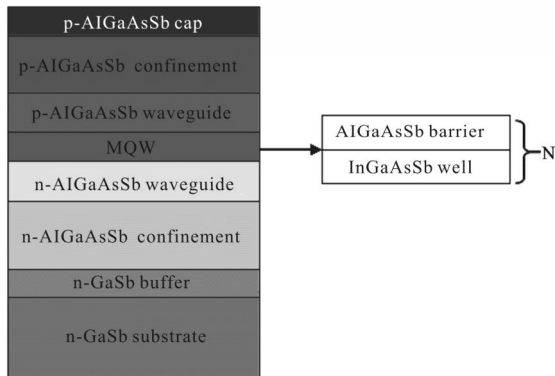


图 1 InGaAsSb/AlGaAsSb MQW 半导体激光器结构示意图

Fig.1 Schematic of InGaAsSb/AlGaAsSb MQW laser diode

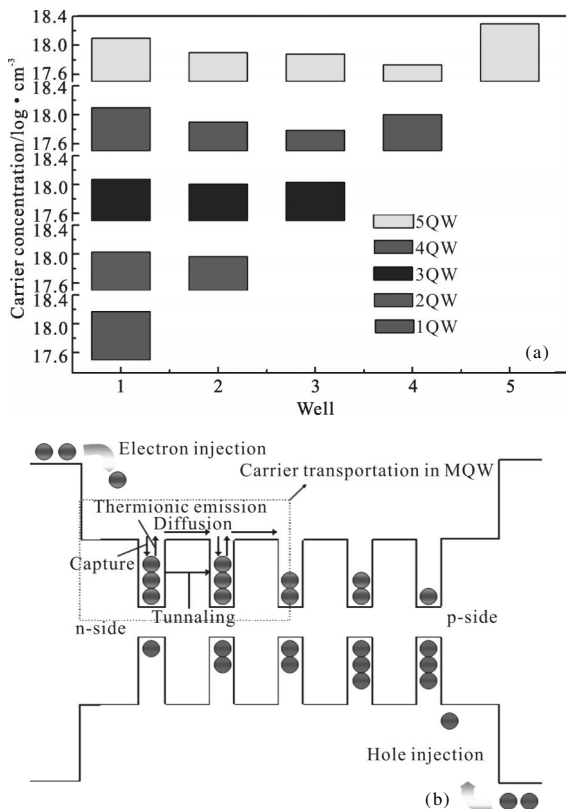


图 2 (a)不同阱数的 InGaAsSb/AlGaAsSb 半导体激光器各个阱内电子浓度分布情况(b)载流子在多量子阱中运输图

Fig.2 (a)Average electron density distribution of InGaAsSb/AlGaAsSb MQW laser with different QW numbers (b)Visualization of charge injection into MQW structure

(2) 阱中载流子直接通过隧穿方式进入第二个阱。第二个阱的载流子再以相同的形式进入下一个阱,以此类推,如此重复。

当量子阱数增至 3 时,电子可均匀的注入到各个量子阱中。但随着阱数目进一步增加时,电子对前面阱的注入会使注入到后面阱内的电子数明显减小,但最后一个阱内电子增多,电子的分配不均匀现象变得严重。这是由于当量子阱数太多时,载流子的扩散使得每个阱内的载流子注入不均匀,而电子泄漏使得最后一个阱内电子浓度升高。当量子阱个数为 5 时,注入到第四个量子阱内的电子仅为第 5 个量子阱阱内电子的 1/3 左右,这将严重地影响激光器的阈值特性。

图 3 为不同量子阱个数的器件的能带图。其中,单量子阱的费米能级与附近的垒的能带距离最近,小于其他多量子阱激光器,这说明单量子阱对电子的束缚能力较弱。另外,从图 4 可以看出,单量子阱的 p 型层电子泄漏现象明显。这是由于电子具有较小的有效质量和较高的迁移率,可以轻易的越过波导层,到达 p 型限制层。而空穴有着与电子相反的特性,可以很好的限制在量子阱内,因此在 n 型限制层内未发现空穴泄漏现象。随着量子阱个数的增加,载流子向限制层的泄漏程度降低,当量子阱个数为 3 时,p 型层中的电子浓度最低,为单量子阱 p 型层中的电子浓度的一半左右,电子泄漏现象改善,如图 5 所示。但随着阱数的进一步增加,注入到阱内的载流子数过多,能带倾斜严重,p 型层中电子浓度升高,增加了有源区内损耗,影响了器件性能^[10],如图 6 所示。

对于相同电流下载流子复合率来说,当量子阱个数为 3 时,总辐射复合率最大,如图 7 所示。这是因为当量子数目为 3 时,载流子可均匀地注入到各个量子阱中,电子-空穴波函数重叠率高。而当阱的个数继续增加时,电子和空穴的浓度分布不均匀,增加了非辐射复合(主要是俄歇复合)^[11],总复合率下降。所以综合以上原因,阱 3 是该器件的最佳量子阱数目。

另外,利用 Fisher 模型^[12] 计算了不同应变下 InGaAsSb/AlGaAsSb 临界厚度,当有源层 In_{0.25}Ga_{0.75}As_{0.02}Sb_{0.03}/Al_{0.25}Ga_{0.75}As_{0.02} 时,应变大小为 1.5%,临界厚度为 103 nm 左右,如图 8 所示。由于最佳量

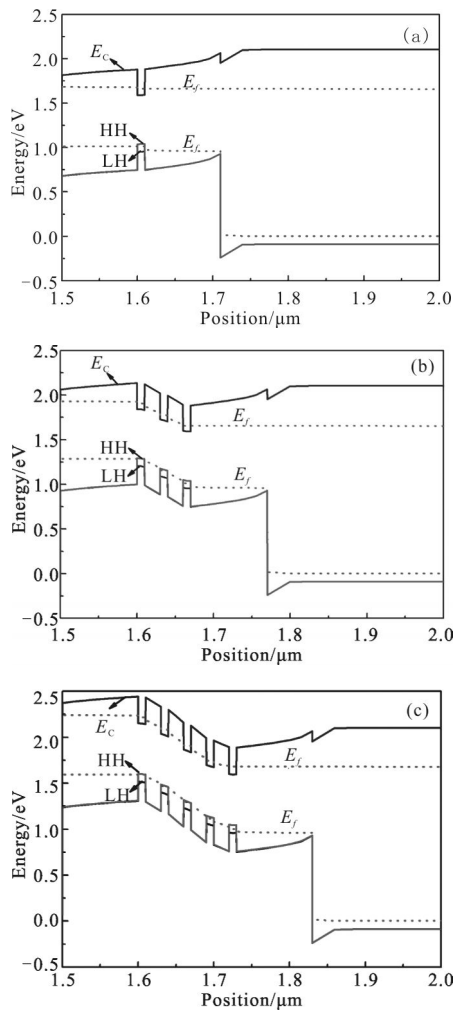


图 3 不同量子阱个数的 InGaAsSb/AlGaAsSb 100 mA 的半导体激光器的能带图

Fig.3 Energy band diagrams of the InGaAsSb/AlGaAsSb LDs with various QW numbers at 100 mA

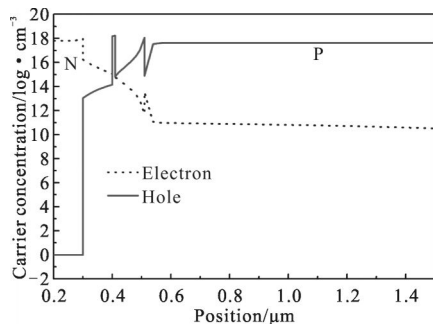


图 4 单量子阱 InGaAsSb/AlGaAsSb LD 100 mA 的载流子浓度分布图
Fig.4 Distribution of carrier concentrations of the InGaAsSb/AlGaAsSb SQW LD at 100 mA

子阱个数为 3,有源区总厚度为 90 nm,小于该临界厚度,此时外延层材料缺陷较少,具备较高的质量,

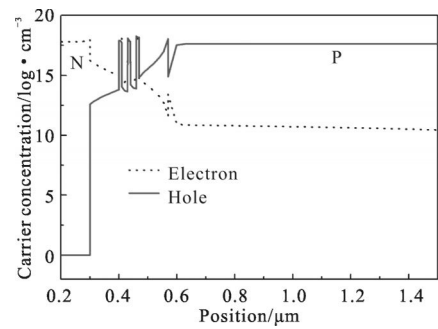


图 5 三量子阱 InGaAsSb/AlGaAsSb LD 100 mA 的载流子浓度分布图
Fig.5 Distribution of carrier concentrations of the InGaAsSb/AlGaAsSb TQW LD at 100 mA

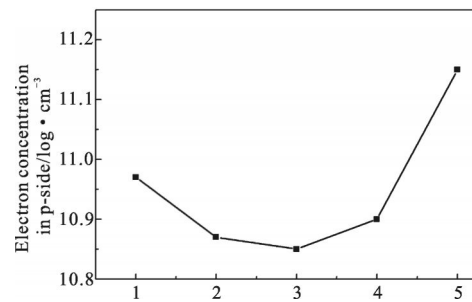


图 6 不同量子阱个数的 InGaAsSb/AlGaAsSb LD 100 mA 的 p 型层中电子浓度图

Fig.6 Electron concentrations of the InGaAsSb/AlGaAsSb LD with various QW numbers in p-side at 100 mA

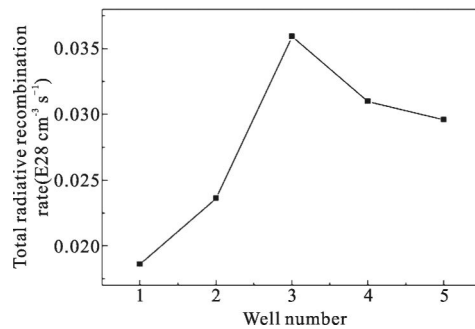


图 7 不同量子阱个数 InGaAsSb/AlGaAsSb 半导体的激光器的总辐射复合率

Fig.7 Total radiative recombination rate of the LDs with various QW numbers at 100 mA

保证了材料的发光特性。这与参考文献[8]实验结果相符。

$$h_c = \frac{bc \cos \lambda}{2\varepsilon} \left[1 + \frac{1-\nu/4}{4\pi(1+\nu)\cos^2 \lambda} \right] \ln \frac{h_c}{b} \quad (9)$$

式中: λ 是 Burgers 矢量方向与界面内垂直于位错线方向的夹角; b 为 Burgers 矢量的模; ν 为泊松比; ε 为应变大小。依据参考文献[13], λ 取 $\pi/3$, b 为 $1/2$ 。

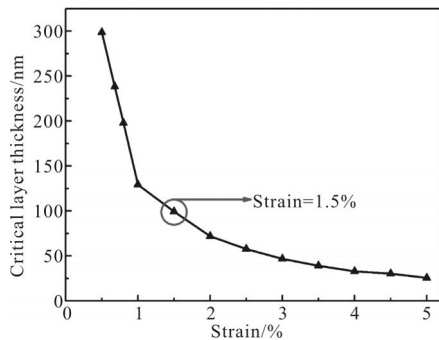


图 8 不同应变下的 InGaAsSb/AlGaAsSb 临界厚度

Fig.8 Critical layer thickness of InGaAsSb/AlGaAsSb with various strains

基于以上方法，文中模拟计算了其他组分的 InGaAsSb/AlGaAsSb 2 μm 半导体激光器的最佳量子阱数目，如表 1 所示。

表 1 2 μm 半导体激光器的最佳量子阱数目

Tab.1 Optimized quantum well number for 2 μm laser diode

	Well In _x Ga _{1-x} As _y Sb _{1-y-x/y}	Barrier Al _x Ga _{1-x} As _y Sb _{1-y-x/y}	Well width/ Barrier thickness	Optimized number
1 ^[14]	0.15/0.05	0.25/0.07	15/16	3
2 ^[3]	0.18/0	0.35/0.02	10/20	2
3 ^[15]	0.2/0.07	0.24/0.02	15/15	2
4 ^[14]	0.25/0.02	0.25/0.02	10/20	3
5 ^[4]	0.38/0.12	0.35/0.02	6/15	3

3 结 论

文中通过对不同量子阱个数的 2 μm InGaAsSb/AlGaAsSb 半导体激光器的能带、电子空穴浓度分布、以及辐射复合率等性能参数模拟及分析，研究发现：随着量子阱数目的增加，进入到阱内的载流子数目加大，但量子阱的个数不是越多越好。当量子阱数过少时，量子阱对电子束缚能力弱，电子在 p 层中泄漏明显。随着量子阱数目增大，载流子在各个阱内分布均匀，电子在 p 层中浓度有效降低(为单量子阱 p 层中浓度的一半左右)，辐射复合率升高。但过多的量子阱数目使得载流子在阱内分配不均匀，p 型限制层中电子浓度的升高，器件内损耗加大，辐射复合率下降。此外，量子阱数量过多将使外延层厚度超过临界厚度，极易产生位错、缺陷，影响外延材料质量。综合以上因素，2 μm InGaAsSb/AlGaAsSb 半导体激光器有源区最优量子阱数目为 2~3。当有源区为

In_{0.17}Ga_{0.83}As_{0.02}Sb_{0.98}/Al_{0.25}Ga_{0.75}As_{0.02}Sb_{0.98} 时，最优量子阱数目为 3，与之前报道的实验结果相符^[8]。当有源区为其他组分时，该研究结果同样适用^[3,13]。文中为 InGaAsSb/AlGaAsSb 半导体激光器的设计和性能表征提供参考和依据。

参 考 文 献：

- [1] Tian Chaoqun, Wei Donghan, Liu Lei, et al. Etching of GaSb-based materials of mid-infrared semiconductor laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42 (12): 3363-3366. (in Chinese)
- [2] Barrios P, Gupta J, Lapointe J, et al. Single-longitudinal-mode InGaAsSb/AlGaAsSb lasers for gas sensing [J]. *Rev Cub Fisica*, 2010, 27(1):42-44.
- [3] Xu Yun, Wang Yongbin, Zhang Yu, et al. High power 2-μm room-temperature continuous-wave operation of GaSb-based strained quantum-well lasers [J]. *Chin Phys B*, 2013, 22(9): 439-441.
- [4] Zhang Tiancheng, Ni Qinfei, Liu Xuezhen, et al. MBE growth of 2.3 μm InGaAsSb/AlGaAsSb strained multiple quantum well diode lasers[J]. *KEM*, 2013, 32(7): 389-392.
- [5] Shi Wei, Huang Lirong, Duan Ziguang, et al. Non-Uniform distribution of injected carriers in multiple quantumWell [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(9):1313-1316. (in Chinese)
- [6] Alahyarizadeh G H, Hassan Z, Thahab S M, et al. Investigation of the performance characteristics of 500 nm to 510 nm green InGaN MQWs laser diodes[J]. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, 2013, 8(2):529-540.
- [7] Liang Xuemei. Configuration disquisitions of high power semiconductor lasers [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2010. (in Chinese)
- [8] Li Zhanguo. Study on epitaxial growth of 2 μm semiconductor laser materials and device fabrication [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [9] Jambunathan R, Singh J. Effects of non-uniform charge injection on gain, threshold current, and linewidth enhancement factor for a 1.55 μm InP-based multiple quantum well laser [J]. *J Appl Phys*, 1996, 80 (12): 6875-6879.
- [10] O'Brien K, Sweeney S J, Dams A R, et al. Recombination processes in mid-infrared InGaAsSb diode lasers emitting at 2.37 μm[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(051104): 1-3.
- [11] Jia Guozhi, Yao Jianghong, Liu Guoliang, et al. Effect of

- Auger recombination on the threshold current of strained quantum well laser [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2007, 24(1): 105–109. (in Chinese)
- [12] Fischer A, Kiihne H, Richter H. New approach in equilibrium theory for strained layer relaxation [J]. *Physical Review Letters*, 1994, 73(20): 2712–2715.
- [13] Zhang Ziyang, Zhang Baolin, Zhou Tianming, et al. Study on the interface of GaInAsSb/GaSb heterostructure with scanning transmission electron microscope [J]. *Journal of Functional Materials*, 2000, 31(5):505–507. (in Chinese)
- [14] Lin Chun. Investigation of devices and physics for 2 μm antimonide lasers and photodiodes [D]. Shanghai: Chinese Academy of Science, 2001. (in Chinese)
- [15] Zhang Y G, Li A Z, Zheng Y L, et al. MBE grown 2.0 μm InGaAsSb/AlGaAsSb MQW ridge waveguide laser diodes[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2001, 227–228: 582–585.