

非对称异质波导半导体激光器结构

李 特¹, 郝二娟², 张 月¹

(1. 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;

2. 吉林大学, 物理学院, 吉林 长春 130023)

摘要:提出了一种非对称异质波导半导体激光器外延结构,即通过优化选择材料体系和结构厚度,对器件外延层的 P 侧限制结构和 N 侧限制结构分别设计,从而降低器件的电压损耗,使其满足高输出功率以及高的电光转换效率的要求.从载流子的输运和限制等微观机制出发,对器件的主要输出特性进行了理论分析和数值模拟,并以此为根据设计和制作了一种 1060 nm InGaAs/GaAs 单量子阱非对称异质波导结构半导体激光器,并对器件的主要输出特性进行了测试.实验结果表明,非对称异质结构是降低器件的电压降、增大限制结构对注入载流子的限制,提高半导体激光器电光转换效率的有效措施.

关键词:非对称异质波导结构;电学特性;1060nm 半导体激光器

中图分类号:TN365, TN248.4 **文献标识码:**

An asymmetric heterostructure waveguide structure for semiconductor lasers

LI Te¹, HAO Er-Juan², ZHANG Yue¹

(1. National Key Lab on High Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. College of Physics, Jilin University, Changchun 130023 China)

Abstract: An epitaxy structure with asymmetric hetero-structure waveguide for diode laser is presented, which was optimized by selecting material system and thickness of each layer. The different designs in P-confinement and N-confinement reduce voltage loss and meet the requirement of high power and high electro-optical efficiency. Based on the theory of transportation and confinement, the principal output characteristics were analyzed and simulated. After that, a 1060 nm diode laser with single quantum well and asymmetric hetero-structure waveguide was fabricated and characterized. The measurement results show that asymmetric hetero-structure waveguide is effective to reduce voltage loss and improve the confinement of injection carriers and electro-optical efficiency.

Key words: asymmetric heterostructure waveguide, electrical properties, semiconductor laser

PACS: 42.60.By, 51.50.+v, 42.55.Px

引言

半导体激光器不仅是光纤激光器和固体激光器的理想抽运源,同时也可以直接应用于材料加工、激光医疗以及国防等众多领域,上述这些应用都需要半导体激光器具有较高的出光功率和电光转换效率^[1-2].而目前制约半导体激光器输出功率进一步提高的最主要因素是腔面光学灾变损伤(catastroph-

ic optical damage,简记为 COD)和热饱和现象^[3-4].从这两个方面出发,国内外的许多研究机构对如何提高半导体激光器的输出功率及效率进行了大量的相关研究.其中,在解决 COD 问题上,目前比较理想的方法是采用非对称宽波导结构^[5-6],即利用外延结构中的波导层在 P 侧和 N 侧的厚度差别,使光场中心偏离量子阱区,将光场的对称分布变成非对称分布,同时降低有源区的光限制因子,减小激光器腔面

收稿日期:2014-09-24,修回日期:2015-01-28

基金项目:国家自然科学基金(61107054)

Foundation items:Supported by National Natural Science Foundation of China (61107054)

作者简介(Biography):李 特(1981-),男,吉林梅河口人,长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室副研究员,博士,主要从事 III-V 光电子器件研究. E-mail: litcust@126.com

Received date: 2014-09-24, revised date: 2015-01-28

的功率密度,避免出现腔面灾变损伤(COD)^[7].但是,这种外延结构在P侧和N侧采用同质半导体材料作为波导层和限制层,这虽然可以提供必要的载流子限制和光限制^[8-10],但也造成了各外延层间能带结构(这里主要指导带和价带偏移量)的相对固定,这就对器件限制结构优化的灵活性造成了阻碍.

在非对称波导结构的基础上通过优化P型波导层的掺杂浓度和厚度可以提高器件的电光转换效率,但这种方法主要是通过波导层厚度的优化控制光场在外延层中的分布,达到减少光损耗的目的,其在电学上的优化只考虑了各层材料的电导率和热导率.而除此之外,载流子在输运过程中的能量损失也是影响半导体激光器电光转换效率的重要因素,实际上,它与器件的串联电阻以及开启电压有十分紧密的关联,因此,如何通过外延结构优化降低这部分能量损失就显得尤为重要.

针对以上提出的问题,提出了一种非对称异质波导半导体激光器外延结构,即从半导体异质结构的“能带工程”理论出发,结合光学和电学方面的因素,对P侧和N侧限制结构的材料和构造进行分别设计,实现对载流子输运过程的优化,从而达到降低器件的能量损耗、提高器件输出功率和电光转换效率的目的.

1 结构设计与讨论

半导体激光器的主要输出特性常常反应在电流和电压曲线(I - V 特性)以及电流和功率曲线(I - P 特性)上,正如我们所知,对于处在工作状态的半导体激光器而言,输入的总电功率可以表示成如下形式:

$$P_{\text{输入}} = I \times V = (I_0 + \Delta I)(V_0 + \Delta V) \\ = I_0 \times V_0 + I_0 \times \Delta V + \Delta I \times V_0 + \Delta I \times \Delta V, \quad (1)$$

其中 I 为器件注入电流, V 是器件的工作电压, $I_0 \times V_0 = P_{\text{光}}$, ΔI 和 ΔV 就是所谓的“电流损耗”和“电压损耗”.也就是说,在式(1)中,只有等式右侧中的第一项是有效的输出功率,而其他三项均为器件的损耗功率.

由此可知,要进一步提高现有器件的效率,可以从降低器件的电压损耗和电流损耗入手.因此,我们以1060 nm的宽波导半导体激光器外延结构为基础,分别在有源区N型一侧采用InGaAsP材料体系作为波导层和限制层,而在P型一侧则采用AlGaAs材料体系作为波导层和限制层,构成非对称异质结构波导外延结构,具体如图1所示.在此结构中,由于InGaAsP材料体系能够提供较小的导带差和较大

的价带差,因此,有利于导带电子的注入和在价带中对空穴形成更高的势垒;同理,P型区AlGaAs材料体系的波导层和包覆层能够对电子形成良好的限制,同时减少价带空穴注入有源区的阻碍.另外,InGaAsP和AlGaAs材料体系都具有灵活的组分可调性,这就为外延结构的优化(比如电压损耗的调节)提供了便利条件.

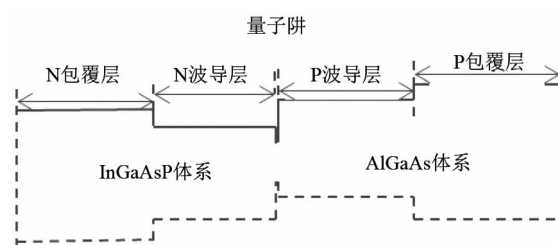


图1 非对称异质限制波导半导体激光器结构示意图
Fig. 1 Schematic of semiconductor laser with asymmetric hetero-structure waveguide

为了研究非对称异质波导结构对器件特性的影响,我们选取了两种外延结构进行对比研究,如图2所示,其中(a)结构与(b)结构各层厚度和掺杂浓度都相同,并且有源区以及P型波导层和包覆层结构也完全相同,有源区均为9nm厚的 $\text{In}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ 单量子阱.各层的掺杂浓度如下:n-GaAs衬底掺杂浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,n-GaAs缓冲层和下限制层掺杂浓度分别为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 和 $7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.下波导层、有源区、上波导层均为非掺杂,上限制层掺杂浓度为 $7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$,GaAs欧姆接触层掺杂浓度为 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.二种结构的差别在于(a)结构的N型波导层和限制层仍然采用与P型一侧相同的AlGaAs材料体系,而(b)结构的N型波导层和限制层采用了InGaAsP材料体系,与P型一侧的AlGaAs材料体系一起构成非对称异质波导结构.以(a)、(b)两种外延结构为基础,我们设定了腔长为1 mm,电流注入区宽度为100 μm 的器件结构,并采用数值模拟的方法对这两种外延结构进行了对比研究.

2 数值计算结果与分析讨论

工作电流、工作电压和输出功率是半导体激光器的三个最重要的特性参数,不同器件间这三个参数的比较也较直观.图3所示为模拟得到的两种结构的电流-功率-电压(Current-Power-Voltage,简记为 I - P - V)曲线,可以看出,两种结构器件的阈值电流略有差异,但并不十分明显;从功率曲线上对比可得到,当工作电流小于2 A时,结构(a)对应的器件输

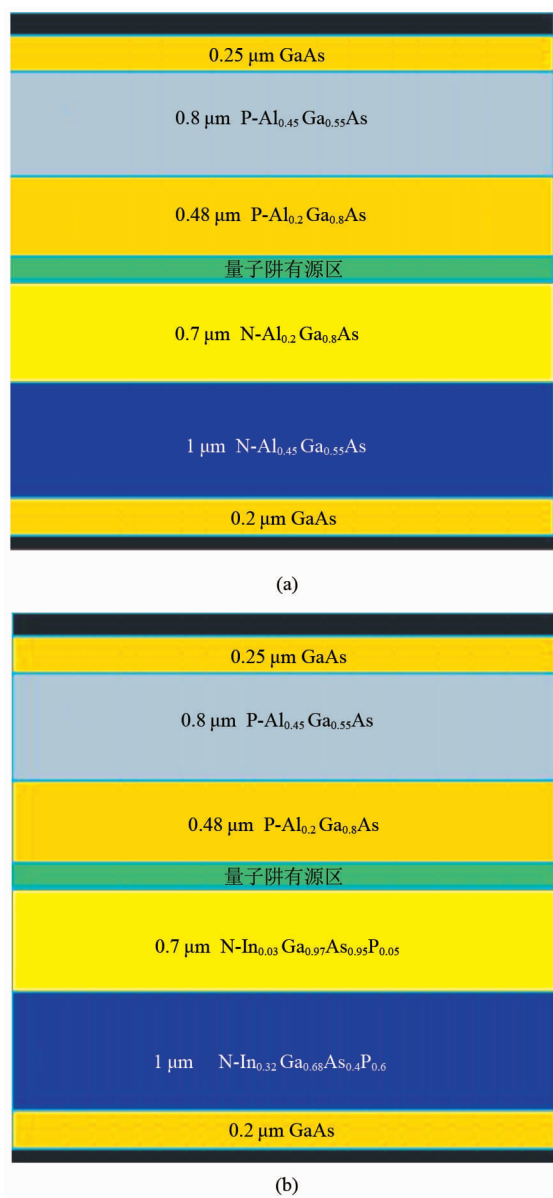


图2 (a) 非对称宽波导外延结构;(b)非对称异质波导外延结构

Fig.2 (a) Epitaxy of asymmetric broad waveguide; (b) Epitaxy of asymmetric hetero-structure waveguide

输出功率略高于结构(b)对应的器件功率;随着注入电流的进一步增加,两条功率曲线逐渐接近.这说明两种外延结构都能够提供足够的载流子限制和光场限制,达到载流子分布反转和受激辐射的要求.此外,经计算,结构(a)和结构(b)的 $I-P$ 曲线的斜率分别为 1.16 和 1.19.也就是说,若继续加大注入电流,结构(b)的功率就会超过结构(a)的输出功率.

对比两种结构的工作电压曲线,可以看出,两条曲线的差别明显,结构(b)的工作电压低于结构(a)的工作电压,且结构(b)的工作电压曲线的斜率较

小.这说明二种器件的串联电阻不同,经计算,我们得到结构(a)和结构(b)对应的器件串联电阻分别为 0.16Ω 和 0.12Ω .

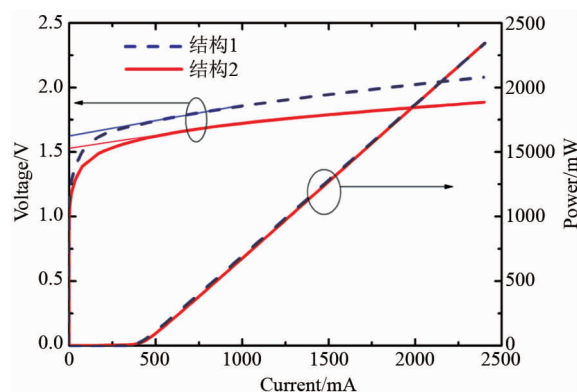


图3 非对称异质结构与非对称宽波导结构的 $I-P-V$ 曲线.图中实线代表非对称异质结构 $I-P-V$ 曲线,虚线为非对称宽波导结构的 $I-P-V$ 曲线

Fig.3 $I-P-V$ curves for devices with asymmetric hetero-structure

上述计算结果表明,两种结构所对应的电光转换效率会有所不同,图4给出了结构(a)和结构(b)的电光转换效率曲线对比.可以看出,当工作电流小于 700 mA 时,结构(a)的效率略高于结构(b)的效率,但当注入电流大于 700 mA 后,情况刚好相反.在我们模拟的注入电流区间,两条曲线都呈单调递增状态,但趋势逐渐平缓.在注入电流最大处,两条曲线都达到最大值,分别为 52.1% 和 47.0% ,结构(b)的曲线斜率大于结构(a)的曲线斜率.这说明两种结构的器件都能在一定的注入电流范围内保持相对较高的电光转换效率,使注入的电流更有效的转换成光输出,减小了激光器在工作过程中的废热,从而降低热饱和现象对激光器带来的不利影响,这有利于实现器件的高功率工作;另外,相对于结构(a)而言,结构(b)的电光转换效率更高,因此也更利于制作高功率器件.

此外,通过对图3中电压曲线的比较,我们可以观察到两种外延结构所对应的开启电压有差别.有理论分析表明,在LD中电压损失是电功率损失的主要原因,其作用的根本表现为串联电阻和内部势垒.因此,为探究两种外延结构对开启电压的影响,我们模拟计算了它们在阈值电流附近的能带图,如图5所示.可以看出,在(a)结构中,N型一侧的导带费米能级在包覆层和波导层的交界处存在明显的下降(如图中插图所示),这说明电子能量在该处出现损耗,其宏观表现即为器件的工作电压损耗;而在

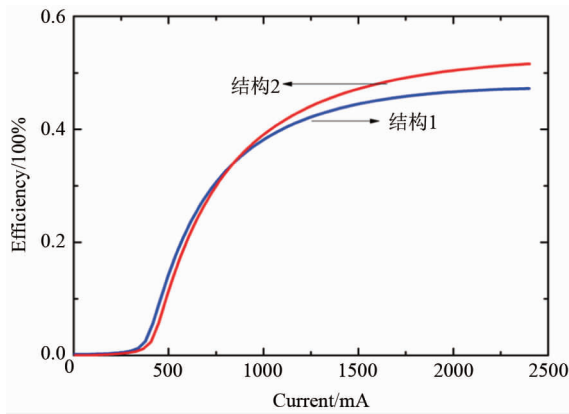


图4 两种外延结构的电光转换效率对比
Fig.4 Comparison of wall-plug efficiency of two kinds of epitaxy structures

(b)结构的能带图中,N型一侧包覆层和波导层间的能量损失明显减小,这种能带结构的优化源于该结构中选用了InGaAsP材料体系.这是因为,一方面,与AlGaAs材料体系相比,InGaAsP材料体系的导带带阶占整个能带差的比例较小;另一方面,InGaAsP材料是一种四元化合物,这为能带结构的优化提供了更多的可操作性.为更直观地说明两种结构的能量损耗差异,我们对它们的导带带阶差和价带带阶差进行了计算,计算结果如图6所示.可以看出,两种结构在No.2处的价带差相同,但二者在No.1处的导带差差距很大,结构(a)此处的导带差为0.052 eV,结构(b)的导带差为0.01 eV.

3 实验结果

利用MOCVD设备,根据优化结果,我们生长了带有非对称异质波导的半导体激光器外延结构. TMIn、TMGa、TMAl被用作三族源,AsH₃和PH₃分别用作AlGaAs材料体系和InGaAsP材料体系的五族源,DEZn和SiH₄被用作受主和施主掺杂源.由于外延结构中InGaAsP和AlGaAs材料体系的生长条件存在很大的差别,所以在材料生长过程中衬底温度变化需要精确优化和控制.采用传统的半导体工艺技术,我们利用生长的外延片制备了条宽97 μm、不同腔长(1 mm、1.5 mm、2.5 mm和4 mm)的半导体激光器管芯,前腔面镀制了单层Al₂O₃增透膜,其在1060 nm处的反射率为4%,后腔面镀制了SiO₂/TiO₂多周期高反膜,其在1060 nm处的反射率为96.5%.随后,制备好的管芯被焊装在C-mount热沉上并采用TO3管壳进行封装.

我们对制备的器件进行了测试,测试结果如图

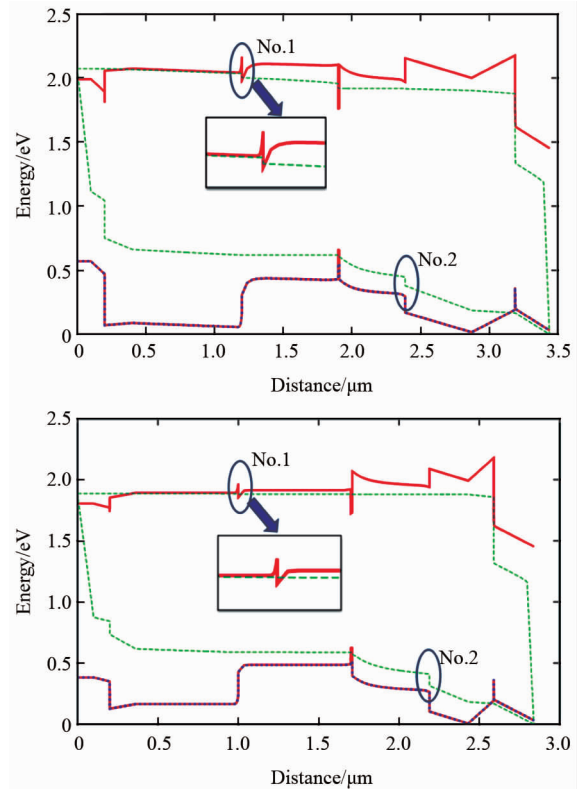


图5 左图为结构(a)能带结构,右图为结构(b)能带结构,图中的No.1和No.2分别代表导带带阶差和价带带阶差
Fig.5 Energy bands for epitaxy a (left) and epitaxy b (right). No.1 and No.2 represent the offsets of conduction band and valence band, respectively

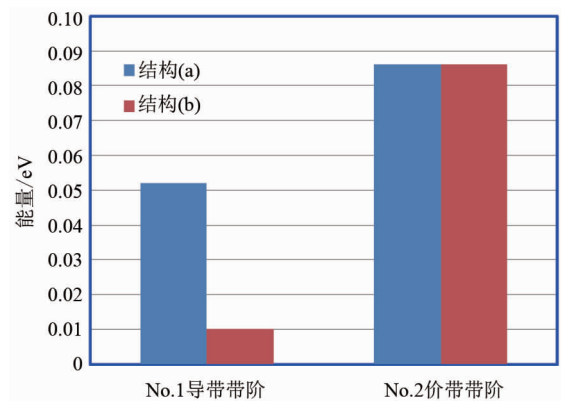


图6 结构a和结构b的导带和价带带阶对比
Fig.6 The offset comparison of conduction and valence bands for epitaxy a and b

7所示,该器件腔长2.5 mm,器件阈值电流为950 mA.当注入电流为6 A时(测试设备的最大输出电流),器件最大输出功率达到6.12 W,需要指出的是,此时器件功率曲线并未出现明显的饱和现象;当注入电流为3.4 A时,器件的最大电光转换效率达

到 62.1%。器件的开启电压约为 1.2 V, 仅比导带和价带的费米能级差大 30 meV; 另外, 当工作电流从 1 A 增加到 6 A 时, 工作电压仅增加了 0.18 V, 这表明器件的电压降得到了很好地控制。

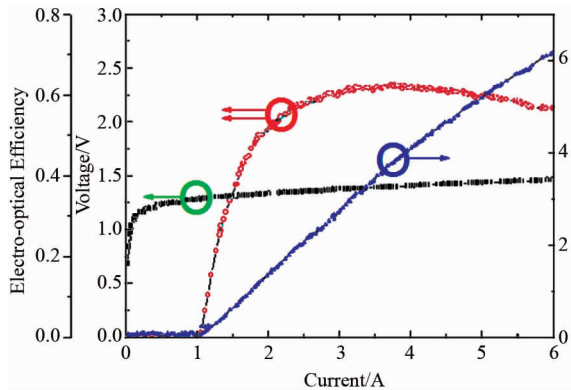


图 7 非对称异质波导结构半导体激光器的连续输出特性曲线

Fig. 7 CW output characteristics of semiconductor laser with asymmetric hetero-structure waveguide

此外, 我们还对具有非对称异质波导和传统波导的两种激光器进行了输出特性对比, 被测试的两种激光器的腔长(1 mm)和条宽(97 μm)均相同。图 8 为两种器件在连续工作状态下的对比测试结果, 其中虚线代表传统波导结构激光器的输出特性, 实线描述的是异质结构波导激光器的输出特性。观察二者的 I-V 特性曲线可以看出, 二者的开启电压几乎相同, 均为 1.15 V 左右, 但随着注入电流的增加, 二者所需的工作电压表现出差异, 非对称异质结构激光器的实际工作电压明显低于传统结构的器件, 这主要归因于非对称异质波导结构有效地减小了外延结构中的电压损耗。同时, 非对称异质结构波导器件在输出光功率方面也优于传统波导结构器件, 当注入电流为 3 A 时, 二者的输出功率分别为 3.12 W 和 2.89 W, 且其变化趋势与电压的变化趋势相近, 究其原因, 是由于非对称异质结构激光器具有更高的功率转化效率, 因此在相似的注入条件下, 其输出功率大于传统结构激光器的输出功率。另外, 通过对比实验结果(图 8)和数值模拟结果(图 3), 我们可以看出, 实验中测得的输出功率要大于模拟结果所示的数值, 这主要是由于实际的阈值电流小于模拟值所致, 其根本原因在于在数值模拟过程中选取的内损耗数值偏高。但从非对称异质波导和传统波导这两种结构的输出特性对比趋势来看, 实验结果与数值模拟结果表现出了较好的一致性。

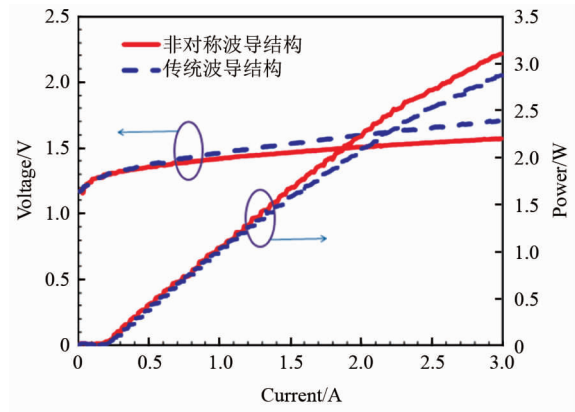


图 8 腔长 1 mm、条宽 97 μm 的两种波导结构半导体激光器的输出特性实验结果对比

Fig. 8 Output characteristics comparison of semiconductor laser with two kinds of waveguide structures and the same cavity length (1 mm) and width (97 μm)

4 结语

提出了一种采用非对称异质波导结构改善半导体激光器特性的方法。通过数值模拟分析, 对比研究了非对称异质波导结构器件与传统波导结构器件的输出特性; 结果表明, 非对称异质波导结构所采用的 InGaAsP 材料体系, 能够降低 N 侧包覆层和波导层之间的电压损失至 0.01 V, 并使器件的输出功率和效率得到提高。实验结果表明, 采用非对称异质波导结构的器件开启电压为 1.2 V, 注入电流为 6 A 时, 器件最大连续输出功率达到 6.12 W, 当注入电流为 3.4 A 时, 器件的最大电光转换效率达到 62.1%。通过对比非对称异质结构波导和传统波导两种激光器的实际输出特性, 相应的数值模拟结果得到了验证。

References

- [1] Alford W J, Raymond T D, Allerman A A. High power and good beam quality at 980 nm from a vertical external-cavity surface-emitting laser [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2002, **19**(4): 663 - 666.
- [2] Bugajski M, Mroziewicz B, Reginski K, et al. High power QW SCH InGaAs/GaAs lasers for 980-nm band [J]. *Bulletin of the Polish academy of Sciences*, 2005, **53**(2): 113 - 122.
- [3] LI Te, HAO Er-Juan, LI Zai-Jin, et al. Optimization of waveguide structure for High power 1060 nm diode laser [J]. *J. Infrared Millim. Waves.* (李特, 郝二娟, 李再金, 等. 高功率 1060 nm 半导体激光器波导结构优化. *红外与毫米波学报*), 2012, **31**(3): 226 - 230.
- [4] LIAN Peng, YIN Tao, GAO Guo, et al. Novel coupled multi-active region high power semiconductor lasers cascaded via tunnel junction [J]. *Acta Phys. Sin.* (廉鹏, 殷涛, 高国, 等. 新型多有源区隧道再生光耦合大功率半导体激光器. *物理学报*), 2000, **49**(12): 2374 - 2377.

- [5] Malag A, Dabrowska E, Teodorczyk M, *et al.* Asymmetric Heterostructure With Reduced Distance From Active Region to Heatsink for 810-nm Range High-Power Laser Diodes [J]. *J. Quantum Elect.* 2012, **48**(4):465–471.
- [6] Buda M, Hay J, Tan H H, *et al.* Low loss, thin p-clad 980-nm InGaAs semiconductor laser diodes with an asymmetric structure design [J]. *J. Quantum Elect.* 2003, **39**(5):625–633.
- [7] YU Hai-Ying, CUI Bi-Feng, CHEN Yi-Xin, *et al.* A novel high-power semiconductor laser diode with large cavity for high efficiency coupling with the optical fibers [J]. *Acta Phys. Sin.* (于海鹰, 崔碧峰, 陈依新, 等. 一种与光纤高效耦合的新型大光腔大功率半导体激光器. *物理学报*), 2007, **56**(7):314–318.
- [8] WEI Gao, Mastrovito A, LUO Ke-Jian, *et al.* High-power 1060-nm InGaAs/GaAs single-mode laser diodes [C] *Proc. SPIE.* 2005, 5711:58–65.
- [9] Fukunaga T, Wada M, Hayakawa T, Reliable operation of strain-compensated 1.06 μm InGaAs/InGaAsP/GaAs single quantum well laser [J] *Appl. Phys. Lett.* 1996, 69:248–250.
- [10] Hasler K H, Sumpf B, Adamiec P, *et al.* 5W DBR Tapered Lasers Emitting at 1060 nm with a Narrow Spectral Linewidth and a Nearly Diffraction-Limited Beam Quality [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2008, 20(19):1648–1650.