高功率 980nm 非对称宽波导半导体激光器设计

徐正文,曲 轶,王钰智,高 婷,王 鑫

(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: 设计了 980 nm 非对称宽波导 InGaAs / InGaAsP 量子阱激光器,并在结构中插入电流阻挡层,有效地阻止载流子的泄露。用 LASTIP 软件对 980 nm 非对称宽波导量子阱激光器进行理论模拟,与传统的 980 nm 对称宽波导量子阱激光器相比,非对称宽波导量子阱激光器波导和量子阱之间有更小的能带差,非对称宽波导结构具有更低的阈值电流,更高的斜效率以及更低的阻抗,所以带有电流阻挡层的 980nm 非对称宽波导 InGaAs/InGaAsP 量子阱激光器有更高的光电转换效率和输出功率。

关键词: 非对称宽波导; 激光器; 高功率; 电流阻挡层

中图分类号: TN248.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)04-1094-05

Simulation analysis of high power asymmetric 980 nm broad-waveguide diode lasers

Xu Zhengwen, Qu Yi, Wang Yuzhi, Gao Ting, Wang Xin

(National Key Laboratory on High Power Semiconductor Laser of Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The design of asymmetric 980 nm InGaAs/InGaAsP broad-waveguide diode lasers with current blocking layer was designed for high-power, which prevents carrier leakage and increases electro-optical conversion efficiency. The properties of the 980 nm asymmetric waveguide quantum well structure lasers were numerically studied with a commercial LASTIP simulation program. Compared to symmetric structure, the lasers with asymmetric waveguide have a smaller band offset between waveguide and QW. The simulation results show that the asymmetric waveguide has a lower threshold current and higher slope efficiency, lower series resistance than symmetric waveguide the structure, so laser performance of asymmetric 980 nm InGaAs/InGaAsP broad-waveguide diode lasers with current blocking layer has higher electro-optical conversion efficiency and laser output power.

Key words: asymmetric broad waveguide; laser diode; high power; current blocking layer

收稿日期: 2013-08-21; **修订日期:** 2013-09-25

基金项目: 吉林省科技发展计划(20111810)

作者简介: 徐正文(1989-),男,硕士生,主要从事半导体激光器结构方面的研究。Email:superxzw531@gmail.com

导师简介: 曲轶(1969-),男,研究员,博士生导师,主要从事半导体光电子方面的研究。Email:quyi@cust.edu.cn

0 引 言

大功率 980 nm 半导体激光器作为掺铒光纤放大器的理想泵浦源，在工业、医疗和军事等领域有广阔的应用前景。为了获得稳定的高输出功率，目前采用宽波导分别限制异质结构。这种结构因为可在发生腔面光学灾变镜面损伤(COMD)之前获得高输出光功率，从而降低了光学限制因子。但是在对称的结构中，为了进一步提高器件的输出功率，需要继续增大波导层厚度，这样导致了一些弊端：其一，较强的载流子泄漏；其二，对称结构的器件由于小光场渗透到 p 型限制层中产生了高阶横模。虽然对波导层的厚度进行了优化计算，但仍不能将载流子泄漏控制在较低的水平。1984 年，M. Oron[1]通过 LPE 技术制作 InGaAsP 单模激光器时使用了电流阻挡层结构，防止了载流子泄露，得到了 60%的外微分量子效率。1994 年，Shin Ishikawa 等人[2]将电流阻挡层加入器件，在不同温度下使激光器的寿命得到了提高。文中在对称结构的基础上设计了非对称波导结构，采用 AlGaAs 的非对称波导，并在结构中插入电流阻挡层，能够有效地防止载流子泄漏，提高输出功率[3]，保证了高的电光转换效率等器件性能。

1 理论分析

半导体激光器的功率转换效率[4]：

$$\eta_c=\eta_d\frac{(I-I_{th})h\omega_e/q}{I^2R_s+I_n h\omega_e/q} \tag{1}$$

式中：$x=V_0/(I_{th}R_s)$；$h\nu$ 和 V_0 分别为激光器的光子激发能和开启电压；I_{th} 和 R_s 分别为阈值电流和串联电阻；η_d 为外微分量子效率。可以看出，提高 η_d 的数值就能提高器件的光电转换效率。

从半导体激光器工作电流和输出电流曲线的线性部分，定义外部量子微分效率，达到阈值电流后

$$\eta_d=\frac{(p_{em}-p_t)/h\nu}{(I-I_{th})/e} \tag{2}$$

式中：p_{em} 和 p_t 分别为与阈值电流相对应的激射功率和输出功率。事实上 η_d 是 $P-I$ 曲线阈值电流以上部分的曲线斜率，所以又称为斜效率[5]

$$\eta_d=\eta_i\frac{\alpha_m}{\alpha_i+\alpha_m} \tag{3}$$

式中：α_i，α_m 为内部损耗和腔面损耗；η_i 为内部量子微分效率。其中

$$\alpha_m=\frac{1}{2L}\ln\left(\frac{1}{R_1R_2}\right) \tag{4}$$

式中：L 为腔长；R_1、R_2 为前腔面和后腔面的反射率。由公式(1)、(2)可知，在确定的情况下，α_m 将不再改变。减少自由载流子的非辐射复合可以提高内部量子效率，从而提高 η_d[6]。

有源区以外的光吸收和掺杂是成比例的。为了减少光吸收，可以降低掺杂，但是会引起电阻和电压的增大[7-8]。所以设计了带有电流阻挡层的非对称宽波导结构的半导体激光器。

2 模拟过程

采用LASTIP 软件对对称宽波导和非对称宽波导两种类型的结构进行模拟与比较，激光器的前腔面镀膜 AR=5%，后腔面镀膜 HR=95%，腔长为 2 000 μm，条宽为 100 μm。

带有电流阻挡层的非对称宽波导激光器做如下结构设计：将厚度为 65 埃的两个应变 $In_{0.2}Ga_{0.8}As$ 量子阱置于禁带宽度为 1.40 eV 的 InGaAsP 上下波导层之间，再将其放置在 1.0 μm 厚的低折射率(n=3.04)材料 $Al_{0.8}Ga_{0.2}As$ n-型限制层的一侧。使用 1.4 μm 厚的高折射率(n=3.23)InGaAsP 材料作为 p-型限制层，将光场控制到该层的边界，可以形成大的侧向折射率导引器件，这样不仅降低了电阻和热阻，而且焦耳热损耗也得到了降低，因此获得了较高的电光转换效率。

通过在低折射率的波导层外围生长一层高折射率的波导层，光场能够很好地限制在有源区中，而在其他层中会存在低光强、高吸收。对于 980 nm 有源区无铝宽波导分别限制异质结激光器来说，将禁带宽度为 1.40 eV 的 InGaAsP 层夹在 InGaAsP 层 (1.62 eV)和 InGaAs 量子阱之间可以防止载流子泄漏的缺陷。除此之外，InGaAsP 层(1.62 eV)厚度为 0.75μm(下波导层厚为 0.1 μm，上波导层厚度为 0.65 μm)，可使激光器大幅度地提高性能和其他应变需求。

该 LD 结构设计还将一个 0.1 μm 厚的 $Al_{065}Ga_{035}As$ 插入上波导层(1.62 eV)和 InGaAsP p-型限制层中，作为电流阻挡层，因此在波导层和 p-型限制层之间

存在一定的带隙差,有效地阻止了载流子泄露到 p-型限制层中。

表 1 非对称宽波导结构

Tab.1 Asymmetric structure with broad waveguide

Layer	Composition	Doping level /cm^{-3}	Thickness/ μm
Cap layer	GaAs	>2×10^{18}	0.2
Cladding layer	$In_{0.42}Ga_{0.52}As_{0.15}P_{0.85}$	1×10^{18}	1.4
Current blocking layer	$Al_{0.72}Ga_{0.18}As$	3×10^{17}	0.1
Upper waveguide	InGaAsP(1.62 eV)	2×10^{17}	0.65
Wave guider	InGaAsP(1.40 eV)	Undoped	0.2
QW	$In_{0.2}Ga_{0.8}As$	Undoped	0.006 5
Barrier	InGaAsP	Undoped	0.015
QW	$In_{0.2}Ga_{0.8}As$	Undoped	0.006 5
Wave guider	InGaAsP(1.40 eV)	Undoped	0.2
Lower waveguide	InGaAsP(1.62 eV)	Undoped	0.1
Down cladding layer	$Al_{0.8}Ga_{0.2}As$	5×10^{17}	1
Substrate	GaAs	2×10^{18}	1

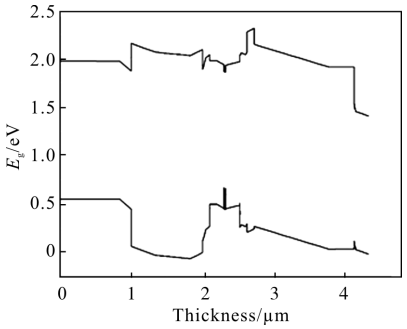
表 2 对称宽波导结构

Tab.2 Symmetric structure with broad waveguide

Layer	Composition	Doping level /cm^{-3}	Thickness/ μm
Cap layer	GaAs	>2×10^{18}	0.2
Cladding layer	$In_{0.42}Ga_{0.52}As_{0.15}P_{0.85}$	1×10^{18}	1.4
Current blocking layer	$Al_{0.72}Ga_{0.18}As$	3×10^{17}	0.1
Upper waveguide	InGaAsP(1.62 eV)	2×10^{17}	0.65
Wave guider	InGaAsP(1.40 eV)	Undoped	0.2
QW	$In_{0.2}Ga_{0.8}As$	Undoped	0.006 5
Barrier	InGaAsP	Undoped	0.015
QW	$In_{0.2}Ga_{0.8}As$	Undoped	0.006 5
Wave guider	InGaAsP(1.40 eV)	Undoped	0.2
Lower waveguide	InGaAsP(1.62 eV)	Undoped	0.65
Down cladding layer	$Al_{0.8}Ga_{0.2}As$	5×10^{17}	1
Substrate	GaAs	2×10^{18}	1

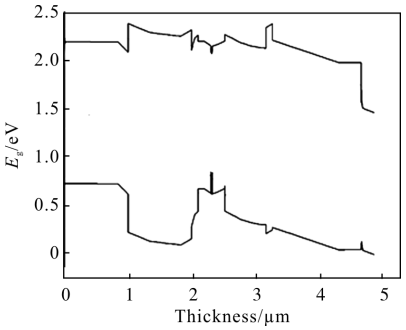
3 结果与讨论

两种结构的能带图如图 1 所示。可以看出,非对称结构和对称结构的量子阱周围的能带偏移量有所不同,非对称波导结构比对称波导结构的能带偏移量要大一些,直接结果就是使电子和空穴的复合大多数发生在靠近 p 型波导的量子阱区域。光场偏向 p 型材料区域,从而减少了高掺杂 n-型限制层自由载流子的光吸收和散射,降低了内损耗。



(a) 对称普通量子阱结构

(a) Regular quantum well structur



(b) 非对称结构

(b) Asymmetric structure

图 1 能带图

Fig.1 Energy band diagram

图2 为非对称结构中的光场分布。可以看出,利用非对称折射率分布波导使器件的光模偏离 n 型材料一侧,同时相当于光场强烈地渗透到了 p 型限制层中。也就是说,减少 n 型限制层的光限制因子,增加 p 型材料一侧的折射率,使光模进入此侧,随着 p 波导层厚度的增加,光强最大值会偏离量子阱,这样有利于减少注入载流子的光学吸收,在非对称结构中,光场模式被阻止进入 n 限制层。

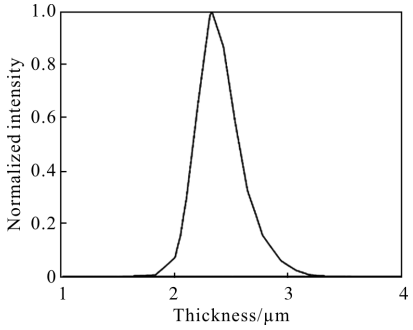


图 2 非对称结构的光场分布

Fig.2 Simulated optical field distribution in asymmetric structure

图 3 为腔长 2 000 μm InGaAs/ InGaAsP 量子阱激光器的激光特性。可以看出，非对称结构开启电压 V_0 和阻抗 R_s 为 1.26 V 和 0.2 Ω，而对称结构的开启电压 V_0 和阻抗 R_s 为 1.41 V 和 0.6 Ω，说明非对称结构具有更低的开启电压和阻抗。

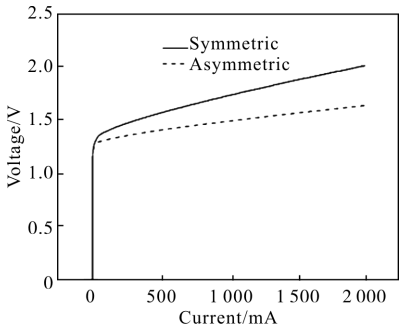


图 3 非对称宽波导和对称宽波导的 $P-I$ 曲线

Fig.3 Current-voltage characters curve for symmetric structure and asymmetric struture

在器件宽度为 100 μm、腔长为 2 000 μm 的条件下模拟得到图 4 所示的对称与非对称波导的对比 $P-I$ 曲线图。可以看出，非对称波导器件的阈值电流

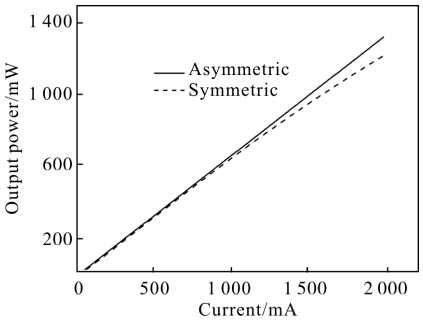


图 4 非对称结构和对称结构的 $P-I$ 曲线

Fig.4 Dependences of output optical power for laser diodes on drive current for symmetric structure and asymmetric structure

密度和斜率效率模拟数值分别为 65 mA 和 0.67 W/A，对称波导器件所对应的值分别为 88 mA 和 0.6 W/A。可以通过公式(1)计算出对称结构和非对称结构的电光转换效率为 51%和 63%，这主要是因为波导层厚度的增加减少了高掺杂包层的部分辐射复合，从而减少了内部损耗，进而提高了光电转换效率。

由公式 (1)、(2)得到得到方程(5)，外微分量子效率的倒数与腔长的函数关系：

$$\frac{1}{\eta_d}=\frac{1}{\eta_i}\left(1+\alpha_i\frac{1}{\frac{1}{2L}\ln\left(\frac{1}{R_1R_2}\right)}\right) \tag{5}$$

通过软件 LASTIP 模拟了多组数据得到两个结构的外微分量子效率的倒数与腔长关系对比，如图 5 所示。

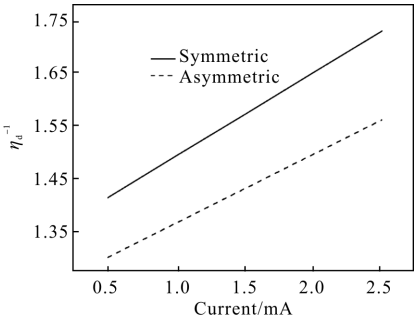


图 5 外部量子微分效率和腔长的关系

Fig.5 Reciprocal external differential quantum efficiency as a funtion of cavity length

由图中的拟合曲线和方程(5)，可以计算得到两个结构的内量子效率 η_i 分别为 81%和 75%，而内损耗 α_i 分别为 1.6 cm^{-1} 和 1.8 cm^{-1}。可以得出结论，非对称波导结构的半导体激光器对减小内损耗、提高微分量子效率有显著的作用。

4 结　论

用 LASTIP 软件对条宽 100 μm、腔长 2 mm 的 980 nm 非对称宽波导结构的量子阱激光器进行模拟。与对称宽波导结构相比，它的阈值电流密度为 290 A/cm^2，电光转换效率为 63%。从模拟研究中得出内部损失系数 α_i 和内在量子效率 η_i 分别为 1.6 cm^{-1} 和 81%。在采用非对称宽波导结构激光器且插入电流阻挡层之后，具有较好的载流子限制，保证了连续工作的高输出功率和电光转换效率。

总之,在非对称宽波导 980 nm InGaAs/InGaAsP 激光器结构中引入高能带 InGaAsP (1.62 eV) 波导层和电流阻挡层之后,得到了高性能的 980 nm 双量子阱激光器。

参考文献:

[1] Oron M, Tamari N. High power single mode InGaAsP lasers fabricated by single step liquid phase epitaxy [J]. ***Appl Phys Lett***, 1983, 42: 139-141

[2] Ishikawa S, Fitkagai K, Chida H, et al. Highly reliable 980 nm strained InGaAs/AlGaAs high-power buried ridge lasers[J]. ***OSA***, 1994, WD4(1): 43-45.

[3] Ma Xiaoyu, Wang Jun, Liu Suping. Present situation of investigations and applications in high power semiconductor lasers [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2008, 37(2): 189-194. (in Chinese)

[4] Botez D, Mawst L J, Bhattacharya A, et al. 66% CW wallplug efficiency from Al-free 0.98 mm-emitting diode lasers[J]. ***Electron Lett***, 1996, 32(21): 2012-2013.

[5] Jiang Jianping. Semiconductor Laser [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2001: 199-200. (in Chinese)

[6] Kanskar M, Earles T, Goodnough T J, et al. 73% CW power conversion efficiency at 50 W from 970 nm diode laser bars[J]. ***Electron Lett***, 2005, 41: 245-247.

[7] KLOPF F. Low threshold high efficiency MBE grown GaInAs=(Al)GaAs quantum dot lasers emitting at 980 nm[J]. ***J Cryst Growth***, 2001, 227-228: 1151-1154.

[8] Krause V, Koesters A, Konig H, et al. Brilliant high-power diode lasers based on broad area lasers [C]//SPIE, 2008, 6876: 697615.