

高功率 1060 nm 半导体激光器波导结构优化

李特¹, 郝二娟², 李再金¹, 王勇¹, 芦鹏¹, 曲轶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 和平校区公共教学中心, 吉林 长春 130033)

摘要:针对高功率 1060 nm 半导体激光器的外延结构, 分析了影响器件功率进一步提高的原因. 根据分析, 优化了激光器的量子阱结构和波导结构, 并理论模拟了波导宽度对模式和输出功率的影响. 根据不同模式的光场分布, 对量子阱有源区的位置进行了优化, 并设计了非对称、宽波导结构. 对不同模式的限制因子进行了计算, 结果表明, 优化后的非对称波导结构能够在降低基模的限制因子的同时, 增加高阶模式的损耗.

关键词:高功率半导体激光器; 1060 nm; 波导宽度; 模式

中图分类号:TN243 **文献标识码:**A

Optimization of waveguide structure for high power 1060 nm diode laser

LI Te¹, HAO Er-Juan², LI Zai-Jin¹, WANG Yong¹, LU Peng¹, QU Yi¹

(1. National Key Lab. of High Power Diode laser, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. The Public Education Center, Heping Campus of Jilin University, Changchun 130033, China)

Abstract: The imperfections in the wafer structure of high power 1060 nm diode laser, which prevents the improvement of laser power, was analyzed. Based on the analyzing results, the quantum well and the waveguide form were optimized. The relationship between waveguide width and laser power was simulated. According to the distribution of various modes, the position of quantum well was optimized and an asymmetric wide waveguide structure was designed. The calculation results of confinement factor for various modes show that the optimized asymmetric waveguide structure could increase the loss of high order modes while decrease the confinement factor of fundamental mode.

Key words: high power diode laser; 1060 nm; waveguide width; mode

PACS: 42.55.Px

引言

1060 nm 波段的激光器在民用和军用领域都有十分重要的应用, 例如, 激光焊接、激光切割、激光退火、激光制导和激光雷达等^[1-2]. 上述应用的实现要求激光器具有较高的输出功率、理想的转换效率和长期工作的可靠性. 目前, 1060 nm 波段的高功率激光器多采用 Nd:YAG 等固体激光器, 尽管固体激光器的光束质量较理想, 但是一般来说, 高功率固体激

光器的转换效率低、整个系统复杂.

半导体激光器具有转换效率高、体积小、重量轻等优点^[3-5]. 近年来, 1060 nm 波段的半导体激光器研究也取得了很多进展. 输出功率达到瓦级的单管器件已经商品化, 其中, 美国 QPC 公司的产品器件输出功率可以达到 2 W. 德国的 FBH 实验室研究的单管输出功率更是达到 5 W^[6]. 这就为 1060 nm 半导体激光器在某些领域替代固体激光器奠定了良好的基础^[7]. 目前, 为了提高该波长的半导体激光器

收稿日期: 2011-04-12, 修回日期: 2011-06-28

Received date: 2011-04-12, revised date: 2011-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(非对称异质结构 1060nm 半导体激光器, 61107054); 国家自然科学基金(集成紫外生物芯片研究, 60976044); 吉林省科技厅项目(高峰值功率、窄脉冲垂直腔面发射激光器, 2008335)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (Asymmetric heterostructure 1060nm diode laser); National Natural Science Foundation of China (research on integrate ultraviolet biological chip); Science Development Project Foundation of Jilin Province (high peak power and short pulse vertical-cavity surface-emitting laser)

作者简介: 李特(1981-), 男, 吉林梅河口人, 博士, 副研究员, 主要研究领域为高功率半导体激光器. E-mail: semiconductorlaser@126.com.

的输出功率,国内外研究机构多采用大光腔结构或超大光腔结构. 该种结构虽然可以提高激光器的腔面灾变损伤阈值,但过大的波导层厚度导致了严重的载流子泄漏以及高阶模的产生,从而降低了器件的插头效率,限制了器件功率的进一步提高^[8,9]. 因此,有必要对高功率 1060 nm 半导体激光器的波导结构,尤其是宽波导结构进行优化设计. 需要说明的是,由于制作工艺的要求,现有的高功率半导体激光器的结构大都采用宽接触结构,该结构对于激光器的侧向模式的限制主要由半导体和空气的折射率差提供,所以,本文对侧向模式不做讨论.

本文从分析影响半导体激光器输出功率的因素入手,优化设计了 1060 nm 半导体激光器的波导结构. 利用非对称波导层的设计,减小了高阶模式的输出,在提高器件输出功率的同时得到了理想的远场发散角.

1 理论分析

目前,影响半导体激光器输出功率进一步提高的最主要因素不是阈值电流和转换效率,而是器件在高功率状态下腔面的光学灾变损伤(COD)现象和热饱和现象. 正如我们所知,半导体激光器的激光出射面积十分小,对于条宽 100 μm 的单管而言,其出光面积约为 100 μm^2 ,而此时如果器件的输出功率达到 1 W,那么腔面的功率密度就为 1 MW/cm^2 . 因此,对于高功率输出的半导体激光器,其腔面的半导体材料在如此高的光功率密度下容易出现损伤,从而破坏腔面的反射或透射作用,造成激光器件的损坏,这就是 COD 现象.

避免 COD 现象的发生、提高腔面损伤阈值的方式很多. 工艺上,可以通过镀制腔面钝化膜或采用窗口结构等工艺方法来提高腔面的损伤阈值. 从器件的结构设计上,可以采用宽波导、大光腔的结构增加激光器的端面出射面积,从而从根本上减小腔面的光密度. 但是,宽波导结构在增加激光出射面积的同时,也导致较强的载流子泄漏和高阶模式的产生. 因此,有必要对高功率半导体激光器的波导结构进行优化设计,在提高器件输出功率的同时,避免上述现象的发生.

根据腔面损伤阈值功率, \bar{P}_{COMD} , 的定义^[10], 半导体激光器的最大输出功率可用如下式子表示,

$$P_{\text{max}} = \left(\frac{d}{\Gamma}\right) W \left(\frac{1-R}{1+R}\right) \bar{P}_{\text{COMD}}, \quad (1)$$

其中, d 是量子阱的厚度, Γ 是光限制因子, W 为条

宽, R 为前腔面反射率, \bar{P}_{COMD} 是一个与有源区材料相关的参数,与表面复合速率有关. 可见,对于一定条宽的、某特定波长的半导体激光器,器件的最大输出功率与 $\left(\frac{d}{\Gamma}\right)$ 成正比. 因此,增加 $\left(\frac{d}{\Gamma}\right)$ 的值,对于宽条形半导体激光器而言是最有效的提高输出功率的方法. 由 $\left(\frac{d}{\Gamma}\right)$ 的数学表达形式可以看出,增加量子阱的厚度或者减小有源区的光限制因子都可以增加 $\left(\frac{d}{\Gamma}\right)$ 的值,从而增加器件的输出功率. 在实际的器件设计过程中,量子阱的厚度对器件的激射波长影响较大,一般对它的调整和量子阱的组分调整是同时进行的. 所以,我们将在这里分别讨论 d 和 Γ 对器件的影响,并以此为根据对 1060 nm 半导体激光器的结构进行优化.

2 结构优化与讨论

图 1 是激光器结构的示意图,有源区采用 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 单量子阱,波导层材料为 GaAs , $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 作为器件的限制层.

由前面的讨论可知,量子阱的厚度直接影响器件的 COD 现象,进而影响输出特性. 厚度越大,最大输出功率越高,所以,我们在设计外延结构时应该尽量使量子阱的厚度大一些. 但我们知道,量子阱的厚度对激射波长也有重要的影响,当量子阱组分固定时,随着量子阱厚度的增加,激射波长也逐渐增加. 因此,我们需要综合以上因素来确定量子阱的厚度. 图 2 所示为 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 量子阱阱宽,激射波长以及 In 组分的关系图,图中虚线表示激射波长为 1060 nm. 可以看出,随着阱宽和 In 组分的增加,激射波长逐渐增大;为了实现器件的激射波长 1060 nm, In 的组分需在 0.24 到 0.35 这个区间,此时的量子阱宽度可以在 4 nm 到 12 nm 之间选择. 但需要注意的是,此时的量子阱是压应变量子阱,而根据

P—AlGaAs 限制层
P—GaAs 波导层
InGaAs 量子阱
N—GaAs 波导层
N—AlGaAs 限制层

图 1 半导体激光器的结构示意图
Fig. 1 Schematic structure of diode laser

Matthews-Blakeslee 的临界厚度理论,量子阱的厚度不能无限地增大,否则将发生应力释放,在量子阱中产生缺陷.综合以上的各种因素,我们将量子阱的厚度选定为 9 nm,相应的 In 组分约为 0.26.

对于实际的器件结构而言,由于有源区的厚度远远小于波导层的厚度,所以,器件的光场主要由波导层和包覆层的折射率分布决定,或者说主要由波导层的厚度决定.根据半导体激光器光场分布的特性和限制因子 Γ 的定义,可以得到 $\left(\frac{d}{\Gamma}\right)$ 的表达式如下^[11]:

$$\frac{d}{\Gamma} \cong \sqrt{\frac{\pi}{2}} t \left(0.31 + \frac{2.1}{D^{3/2}}\right) \quad (2)$$

其中, t 是实际的波导层厚度, D 称为归一化的波导厚度,它反映了器件的结构对某激光波长的有效波导厚度,其表达式如下:

$$D = \frac{2\pi t}{\lambda} \sqrt{n_w^2 - n_{cl}^2} \quad (3)$$

其中 n_w 、 n_{cl} 分别为波导层和包覆层的折射率, λ 是器件的激光波长.

将式(3)代入式(2)后,我们发现式(2)描述的是波导的物理宽度与 $\left(\frac{d}{\Gamma}\right)$ 之间的关系,图 3 即为该表达式的图像.从图中可以看出,当波导厚度小于 0.26 μm 时, $\left(\frac{d}{\Gamma}\right)$ 随着波导厚度的增加而减小;反之,当波导厚度大于 0.26 μm 时, $\left(\frac{d}{\Gamma}\right)$ 随着波导厚度的增加而增加,而且当波导厚度大于 0.5 μm 后,二者几乎呈线性关系.另外,对于宽接触半导体激光器而言,考虑到波导厚度对器件光场分布的影响以

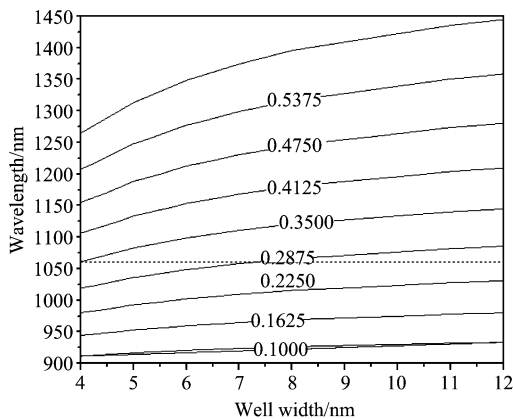


图 2 InGaAs 量子阱中波长、阱宽和 In 组分的关系

Fig. 2 Relationship between wavelength, well width and In composition in InGaAs quantum well

及大功率输出的需求,一般波导层的厚度大于 0.5 μm ,在这种情况下, $\left(\frac{d}{\Gamma}\right)$ 将随着波导层厚度的增加而单调增加.例如,在波导厚度等于 1.2 μm 时, $\left(\frac{d}{\Gamma}\right)$ 的值约是波导厚度等于 0.4 μm 时的 2 倍,也就是说最大输出功率将提高大约 2 倍.

但是,波导层厚度是不能无限增加的,一方面过厚的波导层增加器件的串联电阻,影响器件的电光转换效率;另一方面,随着波导层厚度的增加,载流子泄漏现象将明显增强并且伴随高阶横模的产生.对于激光波长为 1060 nm 的半导体激光器而言,选用图 1 所示的波导层和限制层材料体系,我们计算了激光器的模式与波导厚度之间的关系.结果已标注在图 3 中,具体如下:当 $t > 0.85 \mu\text{m}$ 时,将产生 1 阶横模,当 $t > 1.28 \mu\text{m}$ 时,将产生 2 阶横模,当 $t > 1.71 \mu\text{m}$ 时,将产生 3 阶横模.可见,随着波导厚度的增加,半导体激光器在高电流注入条件下将引起模式竞争,影响器件的出光功率.在我们设计的结构中,选定波导厚度为 1.7 μm ,该波导厚度在保证 $\left(\frac{d}{\Gamma}\right)$ 的值最大化的同时,避免了 3 阶模式的产生.

在对称波导结构中,波导厚度与横模光限制因子的关系如图 4 所示,从图中可以看出,当波导层厚度增加到一定值时,相应的 1 阶模和 2 阶模将出现,其相应的横模限制因子也逐渐可以与基模的限制因子相比拟,但三者均随着波导层厚度的增加逐渐减小.同时也可以观察到 1 阶模的光限制因子要小于基模和 2 阶模的光限制因子,这种现象是由于不同模式的光场在波导层中的分布不同造成的,基模和 2 阶模的波峰与量子阱有源区正好交叠,所以其相

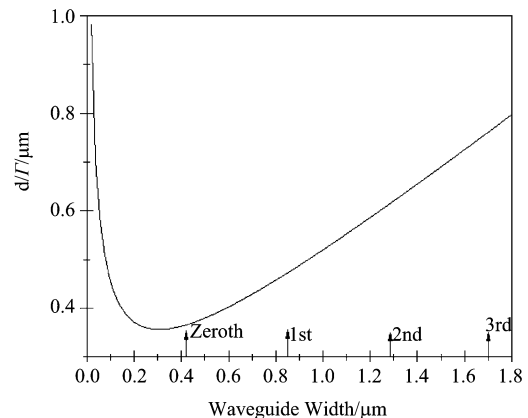


图 3 d/Γ 与波导厚度之间的关系

Fig. 3 The relationship between d/Γ and waveguide width

应的限制因子较大,而 1 阶模的光场分布在有源区处正好是波节,所以限制因子较小. 图 5 即为不同模式的光场在外延结构中的分布示意图,折线所示为外延结构的折射率分布,三条曲线分别为基模、1 阶模和 2 阶模的分布情况. 基于上述分析,可以判断 1 阶模由于限制因子小,因此其激射阈值大于基模和 2 阶模,它对输出功率的贡献较小. 但 2 阶模和基模的限制因子接近,在实际器件工作中,两种模式的阈值电流也相差不大,彼此存在模式竞争,不利于器件的高功率输出和光束质量的提高.

为了解决这一问题,可以采用非对称波导的外延结构. 具体外延结构如图 6 所示,在这种结构中,量子阱的位置不再处在整个波导的中心位置,但正如上面所提到的,由于光场分布主要由波导层来决定,因此在波导层厚度不变的情况下,光场的变化很小. 这就使得量子阱偏离光场中心,从而使其对于某个模式的限制因子发生改变. 在图 6 中,量子阱位置向 P 型区偏移了 0.2 μm ,这样量子阱正好处在 1 阶模和 2 阶模的一个交叠处 S 点,在该点 1 阶模和 2 阶模的限制因子与基模的限制因子比值同时达到最大. 也就是说这种结构能够在某种程度上抑制高阶模式. 同时,由于基模的限制因子有所降低,在量子阱厚度不变的情况下, $\left(\frac{d}{\Gamma}\right)$ 的值进一步增加,从而使器件输出功率进一步增大. 需要说明的是,量子阱向 P 型区偏移后,使得光场与 N 型区的交叠增大,与 P 型区的交叠减小,这就降低了 P 型区的载流子对光子的吸收作用.

选定波导厚度为 1.7 μm 时,我们计算了对称波导结构和非对称波导结构中,3 种模式的限制因子,具体如表 1 所示.

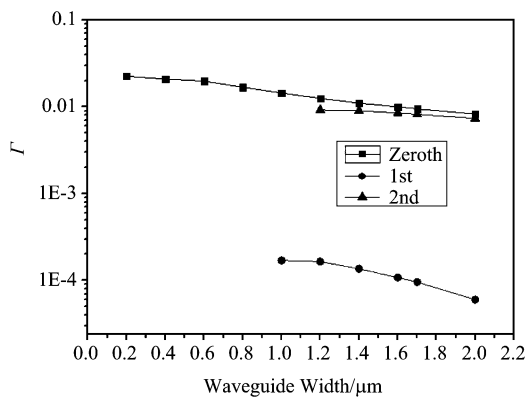


图 4 不同模式的限制因子与波导厚度的关系
Fig. 4 The relationship between Γ and waveguide width for various modes

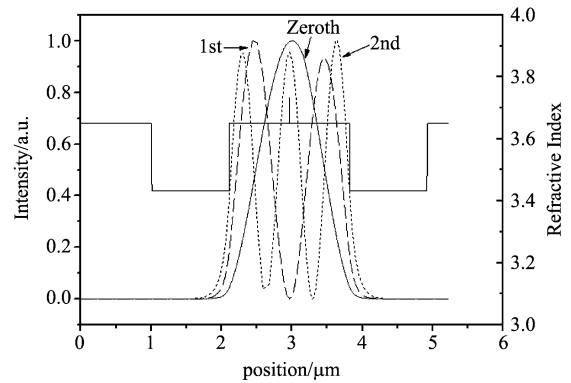


图 5 不同模式的光场强度分布以及外延结构的折射率分布
Fig. 5 Distribution of the intensity of optical filed and the refractive index of wafer

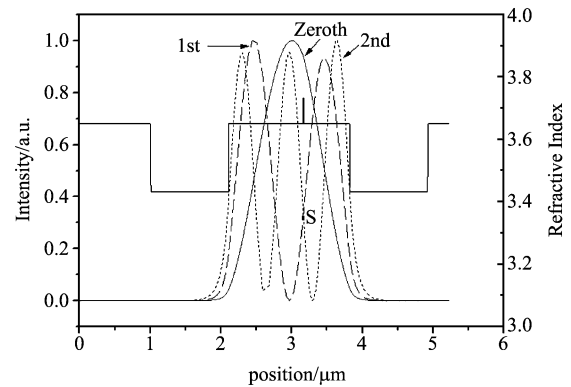


图 6 不同模式的光场强度分布以及外延结构的折射率分布
Fig. 6 Distribution of the intensity of optical filed and the refractive index of wafer

表 1 不同模式的限制因子

	基模限制因子 (10^{-2})	1 阶模限制因子 (10^{-2})	2 阶模限制因子 (10^{-2})
对称波导结构	0.9469	0.00957	0.8198
非对称波导结构	0.8266	0.3126	0.1784

从表中数据可以看出,在对称波导结构中,基模和 2 阶模的限制因子相差很小,在优化后的非对称波导结构中,尽管 1 阶模的限制因子显著增大,但是其值仍然比基模的限制因子小约 2.6 倍. 而 2 阶模的限制因子更是减少至基模限制因子的约 1/5. 因此,在非对称波导结构中,1 阶模和 2 阶模的损耗将增大,其阈值电流也将大幅度提高,器件的模式特性将显著改善.

3 结论

通过对高功率 1060 nm 半导体激光器的结构分

析,明确了阻碍器件功率提高的因素. 模拟研究了量子阱厚度和组分与激射波长的关系,以输出功率为出发点,优化了量子阱的结构. 计算研究了波导厚度对器件输出功率和激射模式的影响,根据各模式光场在波导结构中的分布,对量子阱有源区的位置进行了优化,并设计了 $1.7 \mu\text{m}$ 厚的非对称、宽波导结构. 对不同模式的限制因子进行了计算,结果表明,优化后的非对称波导结构能够在降低基模的限制因子的同时,增加高阶模式的损耗.

REFERENCES

- [1] Lammert R M, Hu W, Oh S W, *et al.* High brightness semiconductor lasers from 780 ~ 1064 nm [C]. Laser Source Technology for Defense and Security III, 2007, Orlando, FL, USA. SPIE 2007, **6552**: 655212(1-7).
- [2] Pietrzak A, Crump P, Bugge F, *et al.* 1060 nm Multi Quantum Well Diode Lasers With Narrow Vertical Divergence Angle of 8° and High Internal Efficiency[C]. Lasers and Electro-Optics, 2009 and 2009 Conference on Quantum electronics and Laser Science Conference, Baltimore. IEEE, CLEO/QELS, 2009 :1-2.
- [3] Pietrzak, Crump P, Wenzel H, *et al.* High Power 1060 nm Ridge Waveguide Lasers with Low-Index Quantum Barriers for Narrow Divergence Angle[C]. Lasers and Electro-Optics (CLEO) and Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS), 2010, San Jose, CA. IEEE, OSA / CLEO/QELS, 2010: 1-2.
- [4] Gao Wei, Mastrovito A, Luo Ke-Jian, *et al.* High power 1060nm InGaAs/GaAs Single-Mode Laser Diodes [C]. High-Power Diode Laser Technology and Applications III, 2005, San Jose, CA, USA. SPIE, 2005, **5711**:58-65.
- [5] Fukunaga T, Wada M, Hayakawa T. Reliable operation of strain-compensated $1.06 \mu\text{m}$ InGaAs/InGaAsP/GaAs single quantum well lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**:248-250.
- [6] Hasler K H, Sumpf B, Adamiec P, *et al.* 5 W DBR Tapered Lasers Emitting at 1060 nm With a Narrow Spectral Line-width and a Nearly Diffraction-Limited Beam Quality, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(19):1648-1650.
- [7] Schwertfeger S, Klehr A, Erbert G, *et al.* Compact hybrid master oscillator power amplifier with 3.1 W CW output power at wavelength around 1061 nm [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(5):1268-1270.
- [8] Prahova P, Moritz I B, Riordan T. High brightness 810 nm long cavity diode lasers with high d/l ratio in asymmetric low confinement epitaxial structure[C]. Proceedings of the 2001 IEEE/LEOS Annual Meeting, 2001, Vol. 1:135-136.
- [9] Ryvkin B S, Avrutin E A. Free carrier absorption and active layer heating in large optical cavity high power diode laser [J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, **100**(10):023104-023112.
- [10] Wade J K, Mawst L J, Botez D, *et al.* 8.8 W CW Power from Broad-Waveguide Al-Free Active-Region ($\lambda = 0.805 \mu\text{m}$) Diode Lasers [J]. *Electron Lett.* 1998, **34**:1100-1102.
- [11] Botez D. Simple Design Rules for Single-Lobe Operation of (Evanescently Coupled) Index-Guided Phase-Locked Arrays of Diode Lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.* 1988, **24**:2034-2038.