

Study on Simulation of 980 nm Small Far Field Divergence Semiconductor Lasers Based on Mode Expansion Layers

Lina Zeng, Lin Li*, Zaijin Li, Zhibin Zhao, Yi Qu, Hongyan Peng

College of Physics and Electronic Engineering, Hainan Normal University, Haikou Hainan
Email: licust@126.com

Received: Oct. 6th, 2018; accepted: Oct. 23rd, 2018; published: Oct. 30th, 2018

Abstract

In order to obtain small far field divergence angle and lower threshold current density, a novel structure of 980 nm InGaAs/GaAs/AlGaAs single quantum well laser based on mode expansion layers has been designed. The effects of mode expansion layers and lower refractive index layers on far field divergence and threshold current density have been investigated using Crosslight software. The calculated results show that the optimized structure has a threshold current density of 257 A/cm² when far field divergence is about 17°. The far field divergence angel can be as low as 15° when the threshold current density is 494 A/cm².

Keywords

Semiconductor Lasers, Far Field Divergence, Threshold Current Density, Confinement Factor, Mode Expansion Layers

基于模式扩展层结构的980 nm小发散角半导体激光器模拟研究

曾丽娜, 李林*, 李再金, 赵志斌, 曲轶, 彭鸿雁

海南师范大学, 物理与电子工程学院, 海南 海口
Email: licust@126.com

收稿日期: 2018年10月6日; 录用日期: 2018年10月23日; 发布日期: 2018年10月30日

*通讯作者。

文章引用: 曾丽娜, 李林, 李再金, 赵志斌, 曲轶, 彭鸿雁. 基于模式扩展层结构的 980 nm 小发散角半导体激光器模拟研究[J]. 现代物理, 2018, 8(6): 265-270. DOI: 10.12677/mp.2018.86029

摘要

为了获得小垂直发散角和较低阈值电流密度, 本文设计了一种基于模式扩展层结构的980 nm InGaAs/GaAs/AlGaAs单量子阱激光器新型结构。通过Crosslight软件模拟优化, 研究了模式扩展层和低折射率层对激光器的垂直发散角及阈值电流密度的影响。当激光器垂直发散角为17°时, 激光器阈值电流密度为257 A/cm²。垂直发散角最小可以达到15°左右, 阈值电流密度为494 A/cm²。

关键词

半导体激光器, 垂直发散角, 阈值电流密度, 限制因子, 模式扩展层

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前, 随着新一代超高速、超大容量光纤通讯的快速发展, 泵浦源如何与光纤高效的耦合越来越引起人们的关注。980 nm 半导体激光器是掺铒光纤放大器最理想的泵浦源, 但是由于激光器有源区厚度很小, 导致其垂直发散角非常大, 使得激光器远场光场光斑呈椭圆形, 降低了980 nm 半导体激光器的泵浦效率和光纤耦合效率。

目前减小半导体激光器垂直发散角的一般方法有非对称波导、宽波导大光腔、模式扩展层等, 李建军等[1]采用非对称超大光腔波导结构, 激光器的垂直发散角降低到24°。Zhu Xiao Pen等[2]优化宽波导大光腔结构制备的980 nm 半导体激光器的垂直发散角降低到23°。F. Bugge等[3]利用宽波导结构获得了InGaAs多量子阱激光器的阈值电流密度约为200 A/cm², 远场发散角为20°。Byungjin Ma等[4]优化了2步N型包层GaInP-AlGaInP量子阱激光器结构, 器件的远场发散角为15.3°。K. H. Hasler等[5]采用InGaAs量子阱超大光腔和分布布拉格反射(DBR)锥形激光器结构, 器件的垂直远场发散角减小至15°。A. Pietrzak等[6]利用超宽厚度(8.6微米)宽波导结构, 得到多量子阱激光器的远场发散角为15.6°。宽波导大光腔结构[7]在减小发散角时会激发高阶模, 且会增大激光器的阈值电流密度, 同时材料外延生长也变得困难。Soohaeng Cho等[8]设计制造了一种特殊结构的激光器, 虽然发散角可以降低到15°左右, 但是阈值电流密度却升高到1600 A/cm², 极大的限制了其应用。模式扩展层结构[9] [10] [11] [12] [13]可以降低激光器的垂直发散角至20°左右, 但器件阈值电流密度通常大于不含扩展波导的普通结构激光器。

本文在980 nm 半导体激光器普通结构基础上, 利用Crosslight软件中的Lastip模块对带有模式扩展层结构的半导体激光器进行模拟仿真, 研究了模式扩展层和低折射率层对激光器的垂直发散角及阈值电流密度的影响。基于模式扩展层结构, 在扩展波导和中心波导层之间加入一个低折射率层, 设计了一种新的半导体激光器结构, 有效降低激光器的远场发散角。调整模式扩展层和低折射率层的折射率和厚度, 可以有效降低激光器的远场发散角。

2. 结构设计和模拟分析

本文中激光器条宽为50 μm, 腔长为800 μm, 前后腔面膜反射率为5%、95%。980 nm 半导体激光

器外延结构：有源区为 $\text{In}_{0.23}\text{Ga}_{0.77}\text{As}/\text{GaAs}$ 单量子阱，量子阱宽度为 6 nm，势垒厚度为 10 nm。波导层为渐变波导，材料为 $0.1\ \mu\text{m}$ 厚的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ， x 从 0.2 渐变至 0.4。限制层为 $1.2\ \mu\text{m}$ 厚的 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 。其中有源区和波导层不掺杂，N 型限制层掺 $1 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ ，P 型限制层掺 $8 \times 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$ 。由光场的近场和远场分布的傅里叶变换以及远场垂直发散角的定义可知，近场光场越宽，远场发散角越小。模式扩展层结构是在普通结构的限制层中对称的插入一个高折射率波导层，如图 1 所示，为含有模式扩展层结构的激光器的折射率及其近场光场图，左纵轴和右纵轴分别对应于激光器的有效折射率和激光器的近场光场。由图 1 可见，近场光场在主峰的两边各产生了一个次峰，这两个次峰的位置正好处于模式扩展层的位置。模式扩展层可以起到扩展近场光场，从而降低远场发散角的作用。图 2 为一种新结构的小发散角激光器的折射率及其近场光场图，基于模式扩展层结构，在扩展波导和中心波导层之间加入一个低折射率层，新结构有效的扩展了激光器的近场光场，能够有效降低激光器的远场发散角。

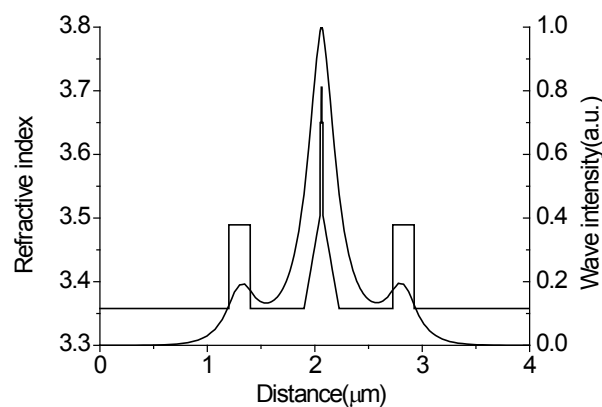


Figure 1. Refractive index profile versus distance of the structure with mode expansion layer and the calculated electric field amplitude at facet

图 1. 模式扩展层结构激光器的折射率及其近场光场

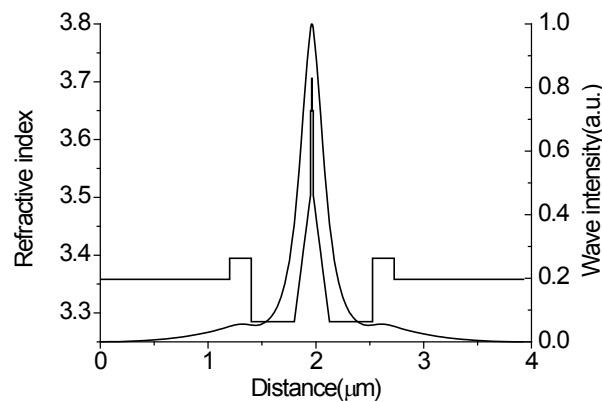


Figure 2. Refractive index profile versus distance of the novel structures and the calculated electric field amplitude at facet

图 2. 新结构激光器的折射率及其近场光场

2.1. 模式扩展层厚度对激光器特性的影响

新结构中的低折射率层材料为 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ ，厚度为 $0.4\ \mu\text{m}$ 。适当调整扩展波导中 Al 的组分，材料为 $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ 。低折射率层和扩展波导层均掺杂，其掺杂浓度分别为 $5 \times 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$ 和 $3 \times 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$ 。图 3 为新结构激光器的垂直发散角和阈值电流密度随模式扩展层厚度变化的关系图。由图 3 可知，随着模

式扩展层厚度的增加，激光器的阈值电流密度以指数函数形式迅速上升，而远场垂直发散角则呈近线性降低，这与普通的含有模式扩展层结构激光器的变化趋势相同。当模式扩展层厚 0.5 μm 时，此时垂直发散角最小为 15°，阈值电流密度达到最大为 494 A/cm^2 ；而当模式扩展层厚度为 0.25 μm 时，激光器的发散角最大为 20°，其阈值电流密度只有 184 A/cm^2 。当模式扩展层厚度 0.4 μm 时，激光器发散角为 17°，阈值为 257 A/cm^2 ，此时发散角很小，阈值电流密度也较低。

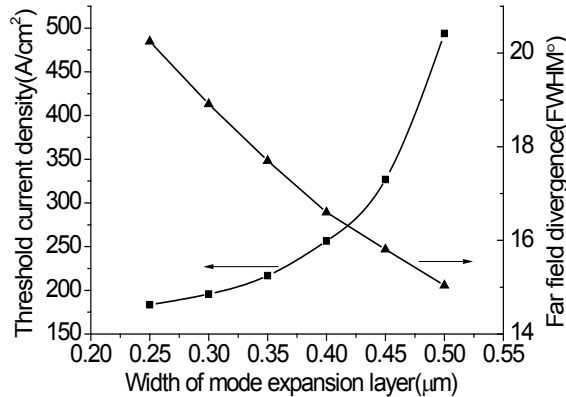


Figure 3. Calculated far field divergence and threshold current density as a function of mode expansion layer width for the novel structures device

图 3. 新结构激光器的垂直发散角和阈值电流密度随模式扩展层厚度变化的关系

2.2. 低折射率层厚度对激光器特性的影响

对新结构中低折射率层的厚度进行模拟优化，设定模式扩展层厚 0.3 μm ，外延层各部分的掺杂、Al 组分等都不改变。如图 4(a)所示，为新结构激光器的垂直发散角和阈值电流密度随低折射率层厚度变化的关系图。由图 4 可见，随着低折射率层厚度的增加，激光器的阈值电流密度近线性降低，垂直发散角的降低趋势逐渐变缓，当厚度达到 0.5 μm 后，低折射率层继续加宽，但是垂直发散角没有明显变化。激光器垂直发散角最小可以降低到 18°，器件的阈值电流密度为 173 A/cm^2 。图 4(b)为对应情况下，器件的光学限制因子与低折射率层厚度的关系，限制因子随着低折射率层厚度增加不断上升。

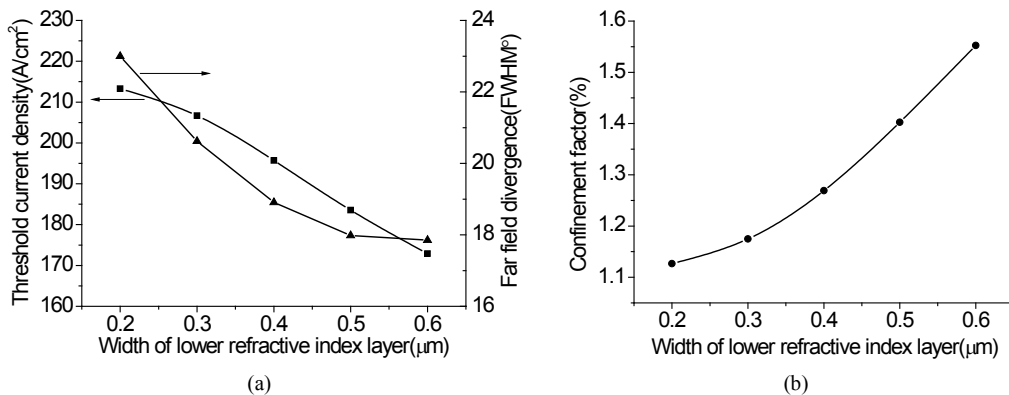


Figure 4. (a) Calculated far field divergence and threshold current density for the new structure device as a function of lower refractive index layer width; (b) Calculated confinement factor for the new structure device as a function of lower refractive index layer width

图 4. (a) 新结构激光器的垂直发散角和阈值电流密度随低折射率层厚度变化的关系；(b) 新结构激光器的限制因子随低折射率层厚度变化的关系

由图 4 可知, 随着低折射率层厚度的增加, 激光器垂直发散角和阈值电流密度均下降, 而光学限制因子却随着厚度的增加而上升, 这一结果与一般结构不同。一般情况下, 垂直发散角降低的同时伴随着限制因子的下降, 而限制因子降低会引起激光器阈值电流密度的增加。对于普通的 InGaAs/GaAs/AlGaAs 模式扩展层结构激光器而言, 在一定厚度范围内随着内限制层厚度的增加, 远场垂直发散角和限制因子呈下降的趋势, 而阈值电流密度则会迅速上升。对于只含有低折射率层的激光器结构而言, 随着低折射率层厚度的增加会使得限制因子上升, 远场发散角降低, 阈值电流密度也不断下降[14] [15]。出现本文这种现象是低折射率层和模式扩展层共同作用的结果, 在这一过程中低折射率层起到了主导作用。

2.3. 模式扩展层和低折射率层 Al 组分对激光器特性的影响

低折射率层和模式扩展层的折射率对激光器的光场、阈值电流密度等有重要的影响, 适当的折射率差可以降低激光器阈值电流和发散角。对此, 通过改变低折射率层 Al 组分(X_L)和模式扩展层 Al 组分(X_M), 研究折射率对激光器性能的影响。确定低折射率层厚度为 $0.4 \mu\text{m}$, 模式扩展层厚度为 $0.3 \mu\text{m}$, 其它不变。图 5(a)为激光器远场发散角和阈值电流密度与模式扩展层 Al 组分的关系, 其中实线对应于阈值电流密度, 虚线对应于远场发散角。每一条曲线代表一个不同的低折射率层 Al 组分, 分别为 0.4、0.45、0.5。图 5(b)为激光器限制因子与模式扩展层 Al 组分的关系。

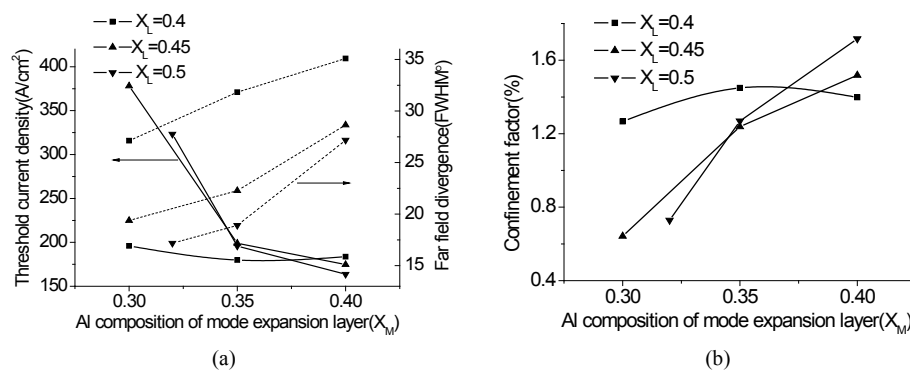


Figure 5. (a) Calculated threshold current density and far field divergence as a function of mode expansion layer Al composition for different lower refractive index layer Al composition (■: $X_L = 0.4$; ▲: $X_L = 0.45$; ▼: $X_L = 0.5$); (b) Calculated confinement factor as a function of mode expansion layer Al composition (■: $X_L = 0.4$; ▲: $X_L = 0.45$; ▼: $X_L = 0.5$)

图 5. (a) 阈值电流密度以及远场发散角与模式扩展层 Al 组分之间的关系, 每条曲线分别代表一个不同的低折射率层 Al 组分 (■: $X_L = 0.4$; ▲: $X_L = 0.45$; ▼: $X_L = 0.5$); (b) 限制因子与模式扩展层 Al 组分之间的关系, 每条曲线分别代表一个不同的低折射率层 Al 组分 (■: $X_L = 0.4$; ▲: $X_L = 0.45$; ▼: $X_L = 0.5$)

由图 5 可知, 当低折射率层 Al 组分 X_L 恒定不变时, 随着模式扩展层 Al 组分 X_M 的升高, 激光器的远场发散角和限制因子不断上升, 而阈值电流密度则不断下降, 而且这种趋势随着低折射率层 Al 组分 X_L 的增加而越来越明显。对于 $X_L = 0.4$ 时, 即为普通的模式扩展层结构, 从图 5(a)可知低折射率层的引入有效的降低了模式扩展层结构激光器的垂直发散角。取 $X_L = 0.5$, $X_M = 0.35$ 时, 器件发散角为 19° , 与普通模式扩展层结构相比, 新结构限制因子低了 0.2% 左右, 阈值电流密度较模式扩展层结构并没有明显的增加。

当 $X_L = 0.5$, X_M 恒定不变时, 激光器垂直发散角始终比 $X_L = 0.45$ 和 $X_L = 0.4$ 时低, 且随着模式扩展层 Al 组分 X_M 从 0.4 降低到 0.32 时, 阈值电流密度和限制因子变化幅度最大, 而当 X_M 降低到 0.3 后, 激光器近场光场变差。这说明在一定的范围内增加低折射率层和模式扩展层中 Al 组分差, 即提高两者的折射率差, 可以降低激光器的发散角和限制因子, 需要注意的是器件阈值电流密度会迅速增大。

3. 结论

本文研究了模式扩展层和低折射率层对激光器的垂直发散角及阈值电流密度的影响。基于模式扩展层结构,在扩展波导和中心波导层之间加入一个低折射率层,利用 Crosslight 软件对半导体激光器特性进行模拟仿真,优化了新结构低折射率层和扩展波导层的厚度以及 Al 组分,设计出一种新型的小发散角、低阈值电流密度的半导体激光器结构。结果表明:新结构比普通的模式扩展层结构有更小的垂直发散角,低折射率层和模式扩展层保持适度的折射率差可以有效降低激光器的远场发散角。当新结构模式扩展层材料为 $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$,低折射率层材料为 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$,厚度均为 $0.4\ \mu\text{m}$ 时,激光器垂直发散角降低到 17° ,此时阈值电流密度为 $257\ \text{A}/\text{cm}^2$;而当低折射率层厚度为 $0.6\ \mu\text{m}$,模式扩展层厚度为 $0.3\ \mu\text{m}$ 时,激光器垂直发散角降低到 18° ,且器件具有更低的阈值电流密度 $173\ \text{A}/\text{cm}^2$ 。

基金项目

海南省自然科学基金(2018CXTD336, 618MS055, 618QN241)资助。

参考文献

- [1] 李建军, 崔碧峰, 邓军, 等. 非对称超大光腔 980 nm 大功率半导体激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1102011.
- [2] Zhu, X.P., Xu, Z.T., Zhang, J.M., *et al.* (2002) A Single Mode 980 nm InGaAs/GaAs/AlGaAs Large Optical Cavity Quantum Well Laser with Low Vertical Divergence Angle. *Chinese Journal of Semiconductors*, **23**, 342-346.
- [3] Bugge, F., Zeimer, U., Staske, R., *et al.* (2007) MOVPE Growth Optimization for Laser Diodes with Highly Strained InGaAs MQWs. *Journal of Crystal Growth*, **298**, 652-657. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2006.10.086>
- [4] Ma, B., Cho, S. and Lee, C. (2005) High-Power 660-nm GaInP-AlGaInP Laser Diodes with Low Vertical Beam Divergence Angles. *IEEE Photonics Technology Letters*, **17**, 1375-1377.
- [5] Hasler, K.H., Sumpf, B., Adamiec, P., *et al.* (2008) 5-W DBR Tapered Lasers Emitting at 1060 nm with a Narrow Spectral Linewidth and a Nearly Diffraction-Limited Beam Quality. *IEEE Photonics Technology Letters*, **20**, 1648-1650. <https://doi.org/10.1109/LPT.2008.2002744>
- [6] Pietrzak, A., Crump, P. and Wenzel, H. (2012) Combination of Low-Index Quantum Barrier and Super Large Optical Cavity Designs for Ultranarrow Vertical Far-Fields from High-Power Broad-Area Lasers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **17**, 1715-1722. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2011.2109939>
- [7] 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[J]. 红外与毫米波学报, 2012, 31(3): 226-230.
- [8] Cho, S., Park, Y. and Kim, Y. (2005) 660-nm GaInP-AlGaInP Quantum-Well Laser Diode Structures with Reduced Vertical Beam Divergence Angle. *IEEE Photonics Technology Letters*, **17**, 534-536. <https://doi.org/10.1109/LPT.2004.842324>
- [9] 杨国文, 徐俊英, 张敬明, 等. 窄发散角量子阱激光器的结构设计与分析[J]. 半导体学报, 1996, 17(7): 500-505.
- [10] Smowton, P.M., Lewis, G.M., Yin, M., *et al.* (1999) 650-nm Lasers with Narrow Far-Field Divergence with Integrated Optical Mode Expansion Layers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **5**, 735-739. <https://doi.org/10.1109/2944.788444>
- [11] Chen, Y.C., Waters, R.G. and Dalby, R.J. (1990) Single Quantum Well Laser with Vertically Integrated Passive Waveguides. *Applied Physics Letters*, **56**, 1409-1411. <https://doi.org/10.1063/1.102483>
- [12] Yen, S.T. and Lee, C.P. (1996) Theoretical Investigation on Semiconductor Lasers with Passive Waveguides. *Quantum Electronics, IEEE Journal of Quantum Electronics*, **32**, 4-13. <https://doi.org/10.1109/3.481914>
- [13] 戴银, 李林, 苑汇帛, 等. 带有模式扩展层的小发散角激光器模拟研究[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1102004.
- [14] Hashimoto, T., Imafuji, O., Takayama, T., *et al.* (1997) Reduction of Beam Divergence Angle by Low-Refractive-Index Layers Introduced to Real-Refractive-Index-Guided GaAlAs High-Power Laser Diodes. *Japanese Journal of Applied Physics*, **36**, 2676-2680. <https://doi.org/10.1143/JJAP.36.2676>
- [15] Li, W.L., Su, Y.K., Chang, S.J., *et al.* (1998) Design of AlGaInP Visible Lasers with a Low Vertical Divergence Angle. *Solid-State Electronics*, **42**, 87-90. [https://doi.org/10.1016/S0038-1101\(97\)00212-8](https://doi.org/10.1016/S0038-1101(97)00212-8)

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2161-0916，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：mp@hanspub.org