

带有模式扩展层的小发散角激光器模拟研究

戴银 李林 苑汇帛 乔忠良 谷雷 刘洋 李特 曲轶

(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 模拟了带有模式扩展层的半导体激光器,研究了中心波导层、扩展波导层和内限制层对激光器性能的影响。经过优化获得了一个条宽为 $50\ \mu\text{m}$,远场发散角为 23° ,阈值电流为 $117.8\ \text{mA}$,限制因子为 2.37% 的激光器。远场发散角最小可达到 18° ,此时阈值电流为 $200.9\ \text{mA}$ 。与普通结构比较,优化后的结构远场垂直发散角减小了 20° 左右,阈值电流并没有明显增加,模拟计算表明模式扩展层没有降低激光器的电学和温度稳定特性。

关键词 半导体激光器; 模式扩展层; 垂直发散角; 阈值电流

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1102004

Study on Simulation of the Small Far Field Divergence Semiconductor Lasers with Mode Expansion Layers

Dai Yin Li Lin Yuan Huibo Qiao Zhongliang Gu Lei Liu Yang Li Te Qu Yi

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

Abstract The impact of center waveguide layers, mode expansion layers and confinement layers on semiconductor laser performance with mode expansion layers has been investigated using the crosslight software. A structure with stripe width of $50\ \mu\text{m}$ and far field divergence angle of 23° is obtained, whose threshold current is $117.8\ \text{mA}$ and confinement factor is 2.37% . The far field divergence angle can be as low as 18° when the threshold current is $200.9\ \text{mA}$. After optimization the far field vertical divergence angle is reduced by about 20° without obvious threshold current increases. The results show that the mode expansion layers do not reduce the electrical properties and the temperature stability characteristics of lasers.

Key words semiconductor lasers; mode expansion layers; far field divergence; threshold current

OCIS codes 140.5960; 230.7380; 310.6860; 230.0250

1 引言

半导体激光器具有体积小、寿命高的优点,但是由于其有源区厚度很小,导致半导体激光器的垂直发散角非常大(一般达到 40° 以上),而水平发散角一般只有 10° 左右。这种情况使得激光器远场光场光斑呈椭圆形,限制了半导体激光器的应用。

现在减小垂直发散角的方法一般有窄波导结构、大光腔宽波导结构、非对称波导等,仲莉等^[1]采用非对称波导结构制作了波长为 $808\ \text{nm}$ 的单量子阱激光器,垂直发散角为 34.8° ,特征温度达到 $133\ \text{K}$;李建军

等^[2]设计了非对称超大光腔波导结构激光器,器件垂直远场发散角减小至 24° 。极窄波导可以大大减小垂直发散角,但是窄波导结构出光端面面积小,光功率密度较大,易发生光学灾变损伤(COD),而宽波导结构^[3]在减小小发散角时会激发高阶模,而且会增大激光器的阈值电流。Elliott 等^[4]设计了一种带有模式扩展层结构的激光器,与已经商业生产的非对称波导结构激光器相比,在发散角相同时模式扩展层结构具有更低的阈值电流和更高的特征温度。

模式扩展层可以减小激光器的垂直发散角,国

收稿日期: 2014-05-23; **收到修改稿日期**: 2014-06-13

基金项目: 国家自然科学基金(60976038, 61107054, 61308051, 61370043)、国家自然科学基金委员会和中国工程物理研究院联合基金(U1330136)、吉林省科技发展计划(20100419)、高功率半导体激光国家重点实验室基金(C1301)

作者简介: 戴银(1990—),男,硕士研究生,主要从事半导体激光器方面的研究。E-mail: daiyinga11@163.com

导师简介: 李林(1972—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事光电子材料与器件方面的研究。

E-mail: licust@126.com (通信联系人)

内外对此都有研究。例如,Smowton等^[5]设计了发光波长为650 nm的AlGaInP半导体激光器,利用模式扩展层结构,发散角减小到23°。Chen等^[6]生长了带有模式扩展层结构的单量子阱激光器,使得垂直发散角减小至19°,但是其阈值电流大于不含扩展波导的普通结构激光器,特征温度比普通结构激光器低30 K。Yen等^[7]优化了带有模式扩展层结构的InGaAs/GaAs量子阱激光器,激光器垂直发散角可减小到21°,而器件的阈值电流却较普通结构增大近20%。除此以外,国内也报道了带有模式扩展层结构的激光器特性^[8-9],在减小器件垂直发散角的同时,也存在阈值电流增大,特征温度和电学特性明显降低的问题。

本文通过crosslight软件中的Lastip模块对带有扩展波导结构的激光器模拟仿真,优化模式扩展层、中心波导层和内限制层的厚度,研究了外延层各部分对激光器垂直发散角、阈值电流、特征温度和电学特性的影响。

2 理论分析

因为光场的远场分布为近场分布的傅里叶变换,其远场分布的角公式为^[10]

$$I(\theta) = \frac{\cos^2\theta}{\lambda_0 r} \left| \int_{-\infty}^{\infty} E_y(x) \exp(ik_0 x \sin\theta) dx \right|^2, \quad (1)$$

式中 λ_0 为光在真空中的波长, k_0 为真空波数, x 为垂直于结平面方向, r, θ 分别为远场一点相对于有源层出射端面中心的距离和与波导中心轴的夹角, $E_y(x)$ 为光场分布。远场垂直发散角的定义为远场半功率点处的全发散角^[11],即 $I(\theta_{1/2}) = \frac{1}{2}I(0)$,由近场和远场的傅里叶关系可知近场光场越宽,远场垂直发散角越小。

对量子阱激光器,已知其阈值电流公式为^[7]

$$J_{\text{th2}} = \frac{J_0}{\eta_i} \exp\left(\beta \frac{\alpha_t}{\Gamma_2 b_0 J_0}\right), \quad (2)$$

式中 J_{th2}, Γ_2 为不含模式扩展层结构的普通量子阱激光器的阈值电流密度和光学限制因子, J_0 为透明电流密度, η_i 为内量子效率, b_0 为增益系数, α_t 为总的损耗。由(2)式可知,光学限制因子(Γ_2)与阈值电流密度(J_{th2})呈反比,光学限制因子的降低会引起阈值电流快速上升。对于含有模式扩展层结构的量子阱激光器结构,其阈值电流公式为

$$J_{\text{th}} = J_{\text{th2}} \exp\left(\beta \frac{\alpha_t}{\Gamma_2 b_0 J_0}\right), \quad (3)$$

式中 β 是一正系数,由(3)式可知,因 $\exp\left(\beta \frac{\alpha_t}{\Gamma_2 b_0 J_0}\right)$ 一般情况下大于1,所以 $J_{\text{th}} > J_{\text{th2}}$,也即模式扩展层结构激光器的阈值电流一般要大于普通量子阱激光器。

对于含有模式扩展层结构的量子阱激光器结构,其光学限制因子公式为

$$\Gamma = (1 + \beta)^{-1} \Gamma_2, \quad (4)$$

式中

$$\begin{aligned} \beta &= 2/(e + d)^2, \\ e &= (n_{\text{eff2}} - n_{\text{eff1}})/(2k), \\ d &= \sqrt{e^2 + 2}, \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $n_{\text{eff2}}, n_{\text{eff1}}$ 分别为中心波导和扩展波导的有效折射率, k 为中心波导和扩展波导的耦合系数;结合(4)式和(5)式,可知带有模式扩展层的激光器的限制因子小于普通结构激光器。

综上所述,当普通量子阱激光器的结构确定,即 $J_{\text{th2}}, \Gamma_2, J_0, n_{\text{eff2}}$ 等保持不变时,带有模式扩展层的激光器的阈值电流、限制因子大小由 β 决定。当改变扩展波导的位置和厚度时,会引起扩展波导有效折射率 n_{eff1} 的改变,继而引起 β 发生变化,最终导致激光器的阈值电流、限制因子和垂直发散角改变。所以,为了得到小的垂直发散角,可以通过改变扩展波导增大 n_{eff1} 来实现。

3 外延结构模拟优化

利用crosslight软件中的Lastip模块对普通的量子阱结构和带有模式扩展层结构的激光器进行模拟和比较。激光器条宽为50 μm ,腔长设为1000 μm ,前后腔面膜反射率为5%、95%。普通激光器外延结构:有源区为 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ 单量子阱,量子阱阱宽10nm;波导层为梯形波导,其中组分不变层为 $\text{Al}_{0.35}\text{GaAs}$,厚度为0.02 μm ,组分渐变层为0.15 μm 厚的 Al_xGaAs , x 从0.35渐变至0.55;限制层为1.2 μm 厚的 $\text{Al}_{0.55}\text{GaAs}$ 。

模式扩展层结构是在普通结构限制层中对称地插入一个 $\text{Al}_{0.35}\text{GaAs}$ 波导层,扩展波导N型掺杂为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ Si, P型掺杂为 $7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ Zn,图1所示为带有模式扩展层结构的激光器的折射率以及与普通结构激光器的近场光场对比图,其中左纵轴为光场强度,已经经过归一化处理,右纵轴为有效折射率,横轴为激光器外延层厚度。适当的折射率差有效地限制了光场,获得了较好的结果。设定中心波导组分不变层为A,中心波导层组分渐变层为B,内限制层为C,模式扩展层为D。同时由图中可以

看出两种激光器结构中心光场分布相同,只是模式扩展层结构在主峰的两边各产生了一个次峰,这两个次峰正好处于模式扩展层的位置,模式扩展层扩展了近场光场,降低了激光器的光学限制因子,降低了远场发散角,图2所示为两种不同结构的远场垂直发散角对比图。

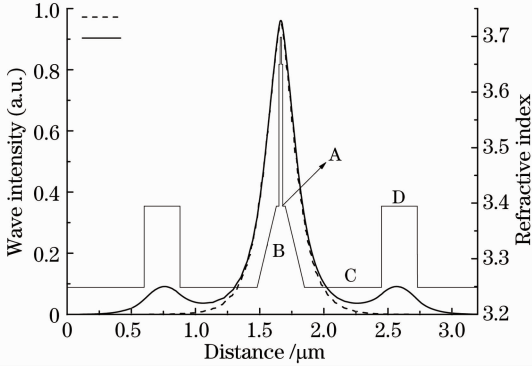


图1 带有模式扩展层结构的激光器的折射率以及与普通结构激光器的近场光场对比图,其中实线为模式扩展层结构激光器,虚线为普通结构激光器

Fig.1 Refractive index profile versus distance of the structure with mode expansion layer and the calculated electric field amplitude at facet (near field) for devices with extra mode expansion layers (solid line) and general structures (dotted line)

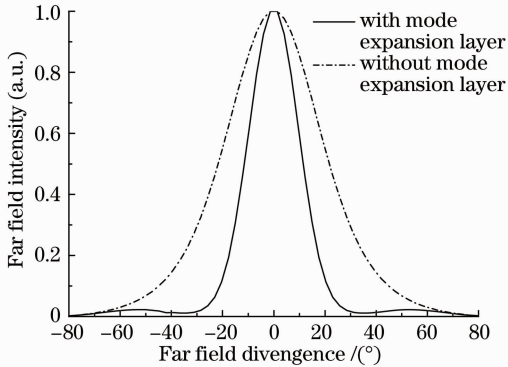


图2 普通结构激光器和带有模式扩展层结构的激光器的远场垂直发散角对比图,其中实线为带有模式扩展层结构的激光器,虚线为普通结构激光器

Fig.2 Calculated far-field intensity profile in the vertical direction for structures with extra mode expansion layers (solid line) and general structures (dotted line). The peak intensities have been normalized for ease of comparison of the full width at half maxima (FWHM) angles

3.1 内限制层 C 和扩展波导层 D 的优化

在模拟过程中通过改变模式扩展层的插入位置和厚度,即改变内限制层 C 和扩展波导层 D 的厚

度,研究了不同条件对激光器性能的影响。图3所示为光学限制因子与模式扩展层位置和厚度的关系,每条曲线分别代表一个不同的插入位置,分别距离中心波导处 0.2, 0.4, 0.6 μm 。从图3可以明显看出光学限制因子随着扩展波导厚度的增加而降低,但是对于不同厚度的内限制层 C,光学限制因子的下降趋势不同;其中内限制层 C 的厚度 $d_c = 0.6 \mu\text{m}$ 处,光学限制因子随着 D 厚度的增加呈抛物线下降,下降幅度最大,趋势也最明显; $d_c = 0.2 \mu\text{m}$ 处,限制因子随着扩展波导厚度的增加以近线的趋势降低,下降幅度最小。当模式扩展层厚度 $d_D < 0.3 \mu\text{m}$ 时, $d_c = 0.6 \mu\text{m}$ 条件下激光器具有最大的光学限制因子,而 $d_c = 0.2 \mu\text{m}$ 条件下光学限制因子最小。当扩展波导 d_D 约为 0.31 μm 时, $d_c = 0.6 \mu\text{m}$ 与 $d_c = 0.4 \mu\text{m}$ 两条线相交,此时光学限制因子约为 1.38%。当 $d_D > 0.31 \mu\text{m}$ 时, $d_c = 0.2 \mu\text{m}$ 条件下具有最大的光学限制因子, $d_c = 0.6 \mu\text{m}$ 条件下光学限制因子最小。较低的光学限制因子有利于扩展近场光场,降低远场发散角,提高激光器的 COD 阈值。

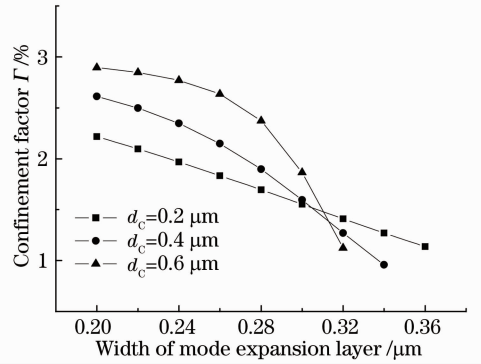


图3 光学限制因子与模式扩展层厚度之间的关系,每条曲线分别代表一个不同的插入位置

Fig.3 Calculated confinement factor as a function of mode expansion layer width for different intervening cladding layer width

图4所示为对应条件下的远场垂直发散角与模式扩展层位置和厚度的关系,当距离为 0.6 μm 时发散角下降最快,而且 $d_c = 0.2 \mu\text{m}$ 情况下,发散角恒大于另外两种条件下的发散角。当 $d_c = 0.6 \mu\text{m}$, $d_D = 0.32 \mu\text{m}$ 时,可以得到最小的远场发散角为 18°。图5为对应条件下的阈值电流与模式扩展层位置和厚度的关系。阈值电流随着模式扩展层厚度增加迅速增加,阈值电流的迅速增大会导致热损耗增大,加速激光器老化,降低激光器的使用寿命,优化的结构需要获得较小的垂直发散角和阈值电流。由图5可知,当 $d_c = 0.6 \mu\text{m}$, $d_D = 0.2 \mu\text{m}$ 时,阈值电

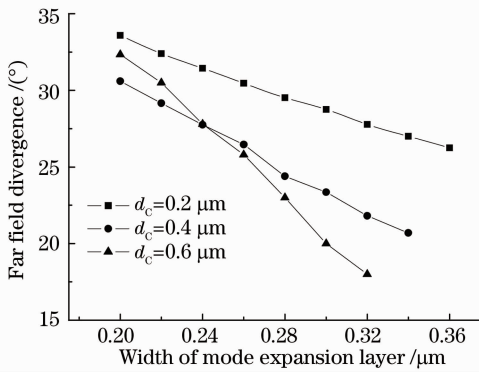


图 4 远场垂直发散角与模式扩展层厚度之间的关系，
每条曲线分别代表一个不同的插入位置

Fig. 4 Calculated far field divergence as a function of mode expansion layer width for different intervening cladding layer width

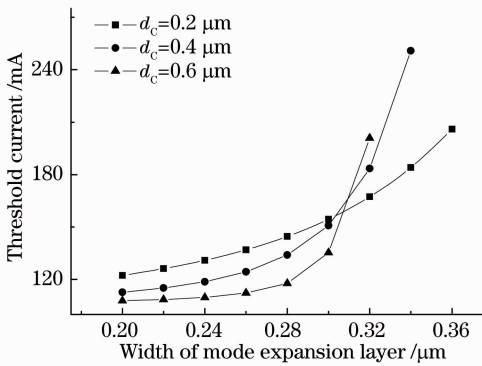


图 5 阈值电流与模式扩展层厚度之间的关系，
每条曲线分别代表一个不同的插入位置

Fig. 5 Calculated threshold current as a function of mode expansion layer width for different intervening cladding layer width

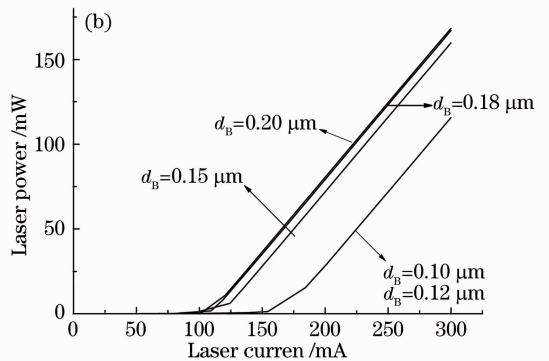
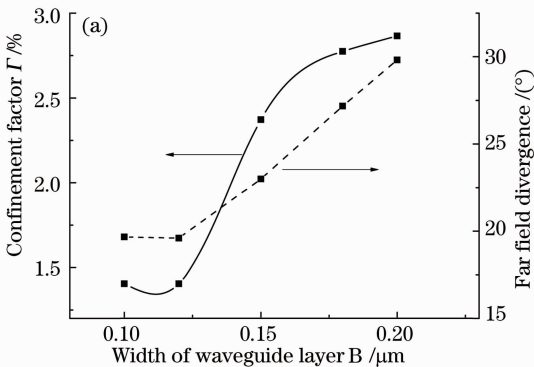


图 6 中心波导层 B 层厚度对激光器特性的影响，其中 A 层厚度 $d_A = 0.02 \mu\text{m}$ 、Al 组分为 0.35， $d_C = 0.6 \mu\text{m}$ ， $d_D = 0.28 \mu\text{m}$ ，限制层 Al 组分为 0.55，模式扩展层 Al 组分为 0.35。(a)中心波导 B 层厚度对激光器光学限制因子和远场发散角的影响；(b)中心波导 B 层厚度不同时激光器的 P-I 特性曲线

Fig. 6 Effect of the thickness of the center waveguide layer B on the laser characteristic. (a) Calculated confinement factor and far field divergence as a function of different thickness of center waveguide layer B; (b) P-I characteristic curves of different thickness of center waveguide layer B

流最低为 111 mA，与普通结构激光器阈值电流 (110 mA) 相近，这说明模式扩展层并没有降低激光器的阈值电流，与(3)式相符。

由图 3~5 可知，模式扩展层 D 的厚度增加会引起光学限制因子和远场垂直发散角下降、阈值电流上升，其中光学限制因子和阈值电流呈抛物线型变化，而发散角呈近线性变化。同时随着内限制层 C 的厚度增加，这种变化趋势就更加明显。综合考虑，确定在距离中心波导 $0.6 \mu\text{m}$ 处对称插入 $0.28 \mu\text{m}$ 的模式扩展层，此时远场发散角为 23° ，阈值电流大小为 117.8 mA，即阈值电流密度为 235.6 A/cm^2 。而此时普通结构激光器的远场发散角为 43.3° ，阈值电流为 110 mA (阈值电流密度为 220 A/cm^2)。这表明优化过程大大降低了激光器垂直发散角的同时并没有引起阈值电流的明显增大。

3.2 中心波导层的优化

模式扩展层的位置和厚度对激光器的发散角、阈值电流等有重要影响，除此以外，中心波导的变化对激光器的特性也有明显影响。图 6 所示为中心波导层 B 的厚度对激光器特性的影响，图中横轴为中心波导层 B 层的厚度 (d_B)，纵轴为光学限制因子、远场发散角和阈值电流。图 6(a) 为 B 层厚度的改变对器件光学限制因子和远场垂直发散角的影响，总体看来随着 B 的厚度不断增加，限制因子和发散角不断增大，当 $d_B = 0.1 \mu\text{m}$ 和 $d_B = 0.12 \mu\text{m}$ 时，激光器发散角最小，为 19.6° ；当 $d_B = 0.2 \mu\text{m}$ 时，发散角最大，达到 29.8° 。图 6(b) 为随着 B 层厚度的改变，不同条件下器件的功率-电压 (P-I) 曲线，由图中可以看出改变 B 层厚度对激光器的斜率没有影响，

激光器的电阻、外量子效率相同,没有变化,而阈值电流随着 B 层厚度增加而降低。

考虑阈值电流和远场发散角两个因素,设定 $d_B = 0.15 \mu\text{m}$ 。通过改变中心波导层 A 层的厚度,研究 A 层厚度对激光器特性的影响,如图 7 所示。图 7(a)为 A 层厚度的改变对器件阈值电流和远场垂直发散角的影响,图 7(b)为光学限制因子随 A 层厚度的改变的变化趋势图。当 A 层厚度 $d_A > 0.04 \mu\text{m}$ 时,光学限制因子和阈值电流基本保持不变,远场发散角仍然随着 A 层厚度的增加不断增大。当 $d_A = 0.01 \mu\text{m}$ 时,阈值电流最大,远场发散角和光学限制因子最小。

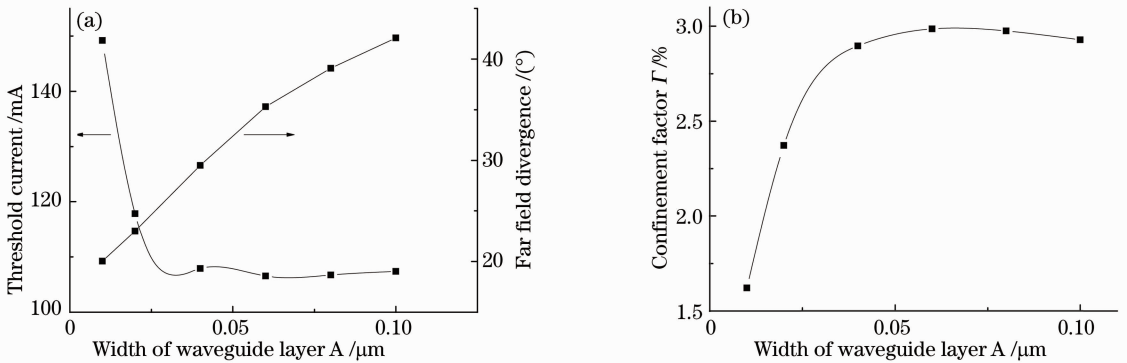


图 7 中心波导层 A 层厚度对激光器特性的影响,其中 $d_B = 0.15 \mu\text{m}$ 、Al 组分从 0.35 渐变到 0.55, $d_C = 0.6 \mu\text{m}$, $d_D = 0.28 \mu\text{m}$, 限制层 Al 组分为 0.55, 模式扩展层 Al 组分为 0.35, 改变中心波导层 A 层的厚度为 $0 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 。(a)随着中心波导层 A 层厚度改变,阈值电流和远场发散角的变化趋势;(b)随着中心波导层 A 层厚度改变,光学限制因子的变化趋势

Fig. 7 Calculated (a) threshold current, far field divergence and (b) confinement factor as a function of different center waveguide layer A width from 0 to $0.1 \mu\text{m}$

4 激光器电学和温度特性比较

与普通结构相比,确定的模式扩展层结构激光器降低远场垂直发散角和限制因子的同时,并没有明显增大激光器的阈值电流,下面将研究模式扩展层对激光器其他方面的影响。P-I 曲线和电流-电压 (I-V) 曲线是描述激光器性能的重要指标,如图 8 所示,为普通结构激光器和带有模式扩展层结构的激光器常温下的 P-I 曲线和 I-V 特性曲线。

由图 8 可以看出,两种不同结构的电流电压特性相似,P-I 曲线和 I-V 特性曲线斜率相同,两种结构的串联电阻和量子效率相同。经计算得出斜率为 0.87,外微分量子效率为 69%。300 mA 注入电流时,模式扩展层结构激光器出射功率为 160 mW,普通结构激光器出射功率为 170 mW。扩展波导结构较普通结构阈值电流增大了 8 mA,工作电压小了 0.05 V,两者之间差距很小。

总体而言,在一定的范围内,随着中心波导层 A 层、B 层厚度的增加,远场发散角和光学限制因子不断增加,阈值电流不断降低。根据不同的要求,可以恰当选择 A 层和 B 层的厚度。

因为带有模式扩展层的激光器从本质上满足多层平板波导模型^[12],多层平板波导与三层平板波导在理论上是一致的,由五层平板波导理论^[13]可知随着波导芯厚度的增加,波导的有效折射率不断增加。根据(5)式增加的中心波导层 A 层、B 层厚度会使 n_{eff} 增加,从而导致 β 减小。联合(3)式和(4)式可知 β 的减小使得激光器阈值电流降低,光学限制因子增加,这与模拟结果相符。

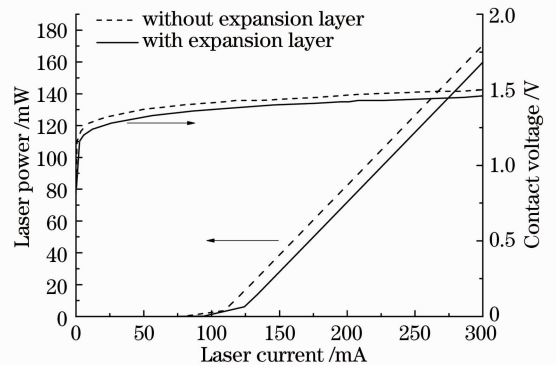


图 8 普通结构激光器和带有模式扩展层结构的激光器的 P-I 曲线和 I-V 特性曲线对比图

Fig. 8 P-I and I-V characteristic curves of the general structures (dotted line) and the optimized structures (solid line)

虽然半导体激光器是高效率的电光转换器件,但是由于外微分量子效率只达到了 69%,这表明有

很大一部分电功率转化成了热能,激光器工作时产生的热量将使腔面温度升高,降低激光器的性能,甚至产生光学灾变损伤^[14]。特征温度(T_0)是表征激光器温度稳定性的重要参数, T_0 越大,说明激光器的稳定性越好。因为半导体激光器与温度之间的关系满足^[15-16]:

$$I_{th}(T) = I_{th}(T_1) \exp\left(\frac{T - T_1}{T_0}\right), \quad (6)$$

式中 $I_{th}(T)$ 和 $I_{th}(T_1)$ 分别是温度为 T 和 T_1 时的阈值电流, T_0 为特征温度,此时取 $T_1 = 300$ K。

图 9 可以表征激光器的特征温度,其中横坐标为模拟温度,纵坐标为对应温度下的阈值电流的对数。经线性拟合,得到两条直线。由(6)式可知,直线的斜率为特征温度的倒数,直线在纵坐标上的截距由 300 K 时的阈值电流和特征温度共同决定。经计算,图 9 中直线的斜率分别为 0.01154 和 0.01171,分别对应于普通激光器结构和带有模式扩展层结构的激光器。所以,普通结构激光器的特征温度为 86.7 K,带有模式扩展层结构的激光器的特征温度为 85.4 K。

这表明模式扩展层的引入对激光器的特征温度无明显影响,普通结构的激光器和带有模式扩展层结构的激光器具有相近的温度特性。

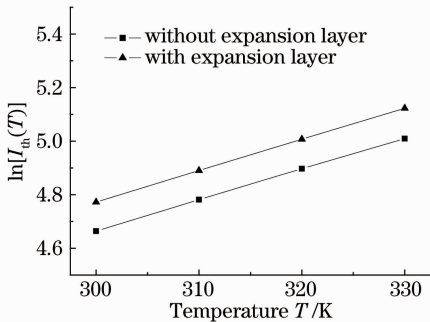


图 9 模拟激光器阈值电流与温度之间的关系

Fig. 9 Relationship between the threshold current and temperature

5 结 论

利用 crosslight 软件模拟了带有模式扩展层的激光器外延结构,研究了中心波导层、扩展层和内限制层对激光器的发散角、阈值电流等方面的影响。获得了一个条宽为 50 μm ,远场垂直发散角为 23°,阈值电流大小为 117.8 mA,即阈值电流密度为 235.6 A/cm² 的激光器。与普通结构激光器相比,模式扩展层结构扩展了近场光场,降低了光学限制

因子,提高了激光器的 COD 阈值,减小了远场垂直发散角,虽阈值电流略有增加,但是没有降低激光器的量子效率、串联电阻等电学和温度特性,模拟取得了较好的结果。

参 考 文 献

- Zhong Li, Wang Jun, Feng Xiaoming, *et al.*. 808 nm high-power lasers with Al-free active region with asymmetric waveguide structure[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(8): 1037-1042.
仲 莉,王 俊,冯小明,等. 808 nm 大功率无铝有源区非对称波导结构激光器[J]. 中国激光, 2007, 34(8): 1037-1042.
- Li Jianjun, Cui Bifeng, Deng Jun, *et al.*. 980 nm high power semiconductor laser with asymmetric super large optical cavity [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40 (11): 1102011.
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.
- Li Te, Hao Erjuan, Li Zaijing, *et al.*. Optimization of waveguide structure for high power 1060 nm diode laser[J]. J Infrared and Millimeter Wave, 2012, 31(3): 226-230.
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.
- Elliott S N, Smowton P M, Berry G. Optimisation of high power AlGaInP laser diodes for optical storage applications[J]. IEE Proceedings-Optoelectronics, 2006, 153(6): 321-325.
- Smowton P M, Lewis G M, Yin M, *et al.*. 650-nm lasers with narrow far-field divergence with integrated optical mode expansion layers [J]. IEEE J Selected Topics in Quantum Electronics, 1999, 5(3): 735-739.
- Chen Y C, Waters R G, Dalby R J. Single quantum well laser with vertically integrated passive waveguides [J]. Appl Phys Lett, 1990, 56(15): 1409-1411.
- Yen S T, Lee C P. Theoretical investigation on semiconductor lasers with passive waveguides[J]. IEEE J Quantum Electronics, 1996, 32(1): 4-13.
- Wang Xiaoyan, Zhao Run, Sheng Mu. High-power semiconductor lasers with small divergence [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(3): 302-304.
王晓燕,赵 润,沈 牧. 小发散角高功率半导体激光器研究 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(3): 302-304.
- An Zhengfeng, Liu Hao, Cheng Hongtai, *et al.*. Development of the single mode laser chip with small divergence and no bonding [J]. Micro-Nanoelectronic Technology, 2011, 48(6): 353-356.
安振峰,刘 浩,陈宏泰,等. 单模小发散角免键合激光器芯片的研制[J]. 微纳电子技术, 2011, 48(6): 353-356.
- Yang Guowen, Xu Junying, Zhang Jinming, *et al.*. Structure design and analysis of quantum well lasers with low beam divergence[J]. Chinese J Semiconductors, 1996, 17(7): 500-505.
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.
- Jiang Jianping. Semiconductor Lasers[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 1998. 88-89.
江剑平. 半导体激光器[M]. 北京: 电子工业出版社, 1998. 88-89.
- Li Yajing, An Zhengfeng, Cheng Guoying, *et al.*. Study of quantum-well laser with small far-field divergence angle [J]. Nano Device and Technology, 2008, 45(11): 635-638.
李雅静,安振峰,陈国鹰,等. 小发散角量子阱激光器研究[J]. 纳米器件与技术, 2008, 45(11): 635-638.
- Ma Chunsheng, Liu Shiyong. Optical Waveguide Mode Theory [M]. Changchun: Jilin University Press, 2006. 103-108.
马春生,刘式慵. 光波导模式理论[M]. 长春: 吉林大学出版社,

2006. 103-108.

- 14 Zheng Xiaogang, Li Te, Lu Peng, *et al.*. Analysis of temperature characteristics of 980 nm semiconductor laser facet [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1102004.
 郑晓刚, 李 特, 芦 鹏, 等. 980 nm 半导体激光器腔面温度特性分析[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1102004.
- 15 Liang Xuemei, Qin Li, Wang Ye, *et al.*. 808 nm edge-emitting diode lasers characteristic temperatures[J]. Acta Optica Sinica,

2010, 30(5): 1391-1395.

- 梁雪梅, 秦 莉, 王 烨, 等. 808 nm 边发射二极管激光器特征温度[J]. 光学学报, 2010, 30(5): 1391-1395.
- 16 Huang Haihua, Liu Yun, Yang Ye, *et al.*. Temperature characteristics of 850 nm tapered semiconductor lasers [J]. Chinese Optics, 2013, 6(2): 201-207.
 黄海华, 刘 云, 杨 晔, 等. 850 nm 锥形半导体激光器的温度特性[J]. 中国光学, 2013, 6(2): 201-207.

栏目编辑: 胡 冰

吉赫兹高功率全光纤超连续谱激光光源

超连续谱光源是一种特殊的光源,具有光谱宽、亮度高、空间相干性好等特点,在照明、通信、医学、军事等诸多领域具有广泛的应用前景。近几年,在突破了超短脉冲抽运源、抽运光耦合、普通光纤与光子晶体光纤低损耗熔接、高功率光纤激光器热管理等一系列关键技术难题之后,高功率超短脉冲光纤激光超连续谱研究进展显著。评价超连续谱指标参数除了功率、光谱宽度之外,还有一个参数——平坦度,平坦度从某种意义上说是描述超连续谱谱宽范围内功率分布特性的参数指标,是在超连续谱应用中衡量有效光谱宽度的参数指标。

北京工业大学联合北京邮电大学利用环形腔主动谐波锁模技术,成功研制了重复频率超过 1 GHz 的全光纤结构的皮秒脉冲光纤激光器种子源,经四级放大系统获得输出平均功率接近百瓦。利用热扩芯技术,成功研制了一款用于高功率工作条件下的光纤模场匹配器,将高功率的皮秒脉冲激光高效率地耦合进了国产小芯径高非线性光子晶体光纤(长飞公司提供)中,得到了平均功率 41.8 W、10 dB 光谱宽度为 1040 nm 的超连续谱激光输出。

采用的超短脉冲光纤激光器种子源输出波长为 1062 nm,重复频率为 1.223 GHz,脉宽小于 10 ps,光纤放大器输出尾纤芯径为 15 μm 。采用的高非线性光子晶体光纤的芯径为 4.8 μm ,零色散波长为 1040 nm,非线性系数为 $11 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,长度为 5 m。

实验最终在抽运脉冲激光功率为 77 W 时,得到了 41.8 W 的超连续谱输出,超连续谱的转换效率为

54%,光谱范围覆盖 600~1700 nm(波长 600 nm 以下和 1700 nm 以上的光谱超过光谱仪测量范围未能观察到),10 dB 光谱宽度为 1040 nm。图 1 给出了超连续谱输出功率随抽运脉冲激光功率的变化曲线,图 2 是超连续谱输出最高功率时的光谱图。

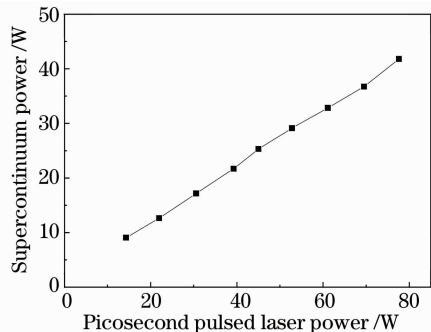


图 1 超连续谱激光功率随脉冲抽运功率的变化
 Fig. 1 Supercontinuum output power versus pulsed pump power

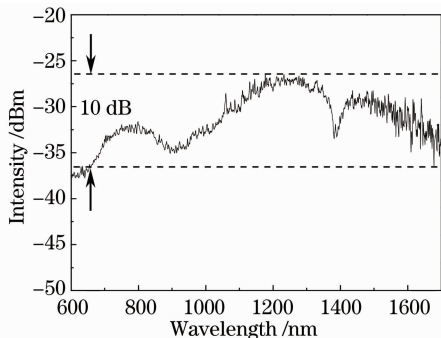


图 2 输出功率为 41.8 W 时的超连续谱光谱图
 Fig. 2 Supercontinuum output spectrum at 41.8 W output power

高 静¹ 葛廷武¹ 李伍一² 伍 剑² 王智勇¹

(¹ 北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124
² 北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)

* E-mail: gaojinggigi@emails.bjut.edu.cn

收稿日期: 2014-09-04; 收到修改稿日期: 2014-09-16