

doi:10.3788/gzxb20164509.0914001

2 μm InGaAsSb/AlGaAsSb 双波导半导体 激光器的结构设计

安宁, 韩兴伟, 刘承志, 范存波, 董雪, 宋清丽

(中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站, 长春 130117)

摘 要: 为了提高 2 μm InGaAsSb/AlGaAsSb 半导体激光器的最大输出功率, 减小远场垂直发散角并实现单模稳定输出, 在非对称波导结构的基础上设计了具有双波导结构的 2 μm InGaAsSb/AlGaAsSb 半导体激光器. 同时, 利用相关的物理模型及 SimLastip 程序语言构建了 InGaAsSb/AlGaAsSb Macro 文件, 利用 SimLastip 软件对具有不同结构的 2 μm InGaAsSb/AlGaAsSb 半导体激光器进行了数值模拟分析. 研究表明, 双波导结构可以将半导体激光器的有源区限制因子由 0.019 2 减小至 0.011 3, 器件的最大输出功率提高了 1.7 倍, 远场垂直发散角由 57° 减小到 48°, 器件性能得到了改善.

关键词: 半导体激光器; InGaAsSb/AlGaAsSb 量子阱; 双波导结构; 低垂直发散角; 数值模拟

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)09-0914001-5

Simulation Analysis of 2 μm InGaAsSb/AlGaAsSb Laser Diode with Dual Waveguide

AN Ning, HAN Xing-wei, LIU Cheng-zhi, FAN Cun-bo, DONG Xue, SONG Qing-li

(Changchun Observatory/NAO, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130117, China)

Abstract: The lower waveguide of 2 μm InGaAsSb/AlGaAsSb laser diode is optimized based on the research of the asymmetric waveguide. With the introduction of dual waveguide, the 2 μm InGaAsSb/AlGaAsSb laser diode has a high output power, a small far field divergence and good single-mode characteristics. The SimLastip simulation of the 2 μm InGaAsSb/AlGaAsSb laser diode with different waveguide structures were established using the related physical model and software design language. And the results indicate that the dual waveguide can almost double the laser power by decreasing the confinement factors of active region from 0.019 2 to 0.011 3 and obtain the good beam quality with small far field vertical divergence angle of 48°. The dual waveguide can favorably improve the performance of 2 μm InGaAsSb/AlGaAsSb laser diode.

Key words: Semiconductor laser; InGaAsSb/AlGaAsSb quantum well; Dual waveguide; Low vertical divergence; Simulation

OCIS Codes: 140.5960; 140.3948; 140.3460

0 引言

波长在 2 μm 附近的人眼安全激光有着广泛的应用领域, 如医疗、材料加工、激光雷达及痕量气体检测等^[1-3]. 这些应用不仅要求激光器具有稳定的高输出功率, 还应具备较小的远场发散角. 为了满足上述设计要求, 常采用不同类型的波导结构. 1998 年, Newell 等^[4]

采用宽波导结构, 有效降低了 2 μm GaSb 基半导体激光器的内损耗, 使量子效率提高到了 74%. 2000 年, C. Mermeistein 等^[5] 采用脊型波导结构, 使 2 μm InGaAsSb/AlGaAsSb 半导体激光器内部损耗降低到 3 cm^{-1} , 电流密度仅降为 44 A/cm^2 . 2006 年, Rattunde 等^[6] 采用窄波导结构, 使其远场发散角减小到 44°, 获得了良好的远场特性.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (Nos. 61605220, 11303063) 资助

第一作者: 安宁 (1988—), 女, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为光电子技术及应用. Email: anning4252@126.com

收稿日期: 2016-03-21; **录用日期:** 2016-06-01

<http://www.photon.ac.cn>

由于半导体激光器体积小、工作机理复杂、制备工艺繁琐,在实际制备之前利用数值仿真技术对半导体激光器进行结构设计十分必要. 目前有关 $2\ \mu\text{m}$ GaSb 基半导体激光器的结构设计仍采用 20 世纪 70 年代提出的数值方法,已远不能满足现代光电子器件制备的需求. 另外,现在大部分半导体数值仿真软件均不含有可靠有效的砷化物半导体材料数据库,不利于对器件进行数值模拟分析及结构优化,这也成为限制该类器件合理地数值模拟分析及结构设计的一个瓶颈.

为了提高 $2\ \mu\text{m}$ InGaAsSb/AlGaAsSb 半导体激光器的输出功率,减小远场垂直发散角,实现单模稳定输出,本文利用相关物理模型及 SimLastip 程序语言,构建了 InGaAsSb/AlGaAsSb Macro 文件,通过 SimLastip 软件对具有不同波导结构的 $2\ \mu\text{m}$ InGaAsSb/AlGaAsSb 半导体激光器进行了数值模拟,并设计了 $2\ \mu\text{m}$ InGaAsSb/AlGaAsSb 双波导半导体激光器.

1 理论分析

半导体激光器的最大输出功率 P_{max} 与器件腔面的光学灾变性损伤 (Catastrophic Optical Damage, COD) 功率密度 P_{COD} 有关^[7],即

$$P_{\text{max}} = \frac{L_{\text{QW}}}{\Gamma_{\text{QW}}} \left(\frac{1-R}{1+R} \right) \cdot W \cdot P_{\text{COD}} \quad (1)$$

式中, L_{QW} 为量子阱宽度, Γ_{QW} 为有源区光限制因子, R 为器件前后腔反射率, W 为器件条宽. 从式(1)可知,当器件量子阱宽度、前后腔反射率、器件条宽一定时,器件最大输出功率 P_{max} 与有源区光限制因子 Γ_{QW} 成反比. 在给定有源区材料的情况下,减小器件的有源区光限制因子 Γ_{QW} 可提高半导体激光器的最大输出功率,改善器件的光束质量.

另外,对于条型半导体激光器,有源区限制因子 Γ_{QW} 应满足^[8]

$$\Gamma_{\text{QW}} = \frac{L_{\text{QW}}}{0.3885L_w^{3/2}(n_w^2 - n_c^2)^{3/4} + 0.1675\lambda^{3/2}} \quad (2)$$

式中, L_w 为波导层宽度, n_w 为波导层折射率, n_c 为限制层折射率, λ 为器件激光波长. 从式(2)可知,有源区限制因子 Γ_{QW} 与波导层宽度 L_w 有密切关系.

为了研究上述关系,本文利用量子隧穿效应的漂移扩散 (Drift-Diffusion, DD) 模型,多量子阱 (Multiple Quantum Well, MQW) 模型、光波导模型、热效应模型及交流分析模型等^[1,6-7],结合 Simlastip 语言、部分 III-V 族材料参量,创建了 InGaAsSb/AlGaAsSb Macro 文件. 以描述器件的电学特性(如 I - V 特性)的漂移扩散模型为例,该模型主要包括泊松方程、电子和空穴电流连续方程、捕获动力学方程,具体表达式见(3)~(6).

泊松方程为

$$-\nabla \cdot \left(\frac{\epsilon_0 \epsilon_{\text{dc}}}{q} \nabla V \right) = -n + p + N_D(1 - f_D) - N_A f_A + \sum_j (N_{vj} \delta_j - f_{vj}) \quad (3)$$

电子和空穴的电流连续方程为

$$\nabla \cdot J_n - \sum_j R_n^{vj} - R_{\text{sp}} - R_{\text{st}} - R_{\text{au}} + G_{\text{opt}}(t) = \frac{\partial n}{\partial t} + N_D \frac{\partial f_D}{\partial t} \quad (4)$$

$$\nabla \cdot J_p - \sum_j R_p^{vj} + R_{\text{sp}} + R_{\text{st}} + R_{\text{au}} - G_{\text{opt}}(t) = -\frac{\partial p}{\partial t} + N_D \frac{\partial f_D}{\partial t} \quad (5)$$

捕获动力学方程为

$$N_{vj} \frac{\partial f_{vj}}{\partial t} = R_n^{vj} - R_p^{vj} \quad (6)$$

式中, ∇V 为电场; ϵ_{dc} 为相对介电常量; n 、 p 为电子与空穴浓度; N_A 、 N_D 为浅层受主和施主掺杂浓度; f_A 、 f_D 为空穴占据受主和电子占据施主的概率; δ_j 为 δ 函数,当为受主时, δ 为 0,当为施主时, δ 为 1; N_{vj} 为界面中第 j 个深能级的密度; f_{vj} 为第 j 个深能级的占有率. 电子的电流密度 $J_n = n \cdot \mu_n \cdot \nabla E_{\text{fn}}$ (μ_n 为电子的迁移率, E_{fn} 为电子的准费米能级); 而空穴的电流密度 $J_p = p \cdot \mu_p \cdot \nabla E_{\text{fp}}$ (μ_p 为空穴的迁移率, E_{fp} 为空穴的准费米能级); R_n^{vj} 、 R_p^{vj} 为第 j 个 Shockley-Read-Hall (SRH) 深能级陷阱复合率; R_{sp} 为自发辐射复合率; R_{st} 为受激辐射复合率; $R_{\text{au}} = (C_n n + C_p p)(n p - n_i^2)$ (C_n 和 C_p 为载流子俘获系数,取决于材料本身; n 、 p 为电子与空穴浓度; n_i 为本征载流子密度); $G_{\text{opt}}(t)$ 代表光产生率.

基于 InGaAsSb/AlGaAsSb Macro 文件,利用 Simlastip 软件对条宽 $100\ \mu\text{m}$ 、腔长 $1\ 000\ \mu\text{m}$ 、具有不同对称波导层宽度的 $2\ \mu\text{m}$ InGaAsSb/AlGaAsSb 半导体激光器进行数值仿真. 器件具体的外延结构如图 1.

| |
|--|
| 0.2 μm GaSb cap($1 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$,Be) |
| 1.5 μm Al _{0.8} Ga _{0.2} As _{0.08} Sb _{0.92} P-cladding($2 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$,Be) |
| X μm Al _{0.3} Ga _{0.7} As _{0.02} Sb _{0.98} Upper-waveguide(Undoped) |
| 10nm/20nm In _{0.2} Ga _{0.8} As _{0.02} Sb _{0.98} /Al _{0.3} Ga _{0.7} As _{0.02} Sb _{0.98} QW |
| X μm Al _{0.3} Ga _{0.7} As _{0.02} Sb _{0.98} Lower-waveguide(Undoped) |
| 1.5 μm Al _{0.8} Ga _{0.3} As _{0.08} Sb _{0.92} N-cladding($5 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$,Te) |
| 0.1 μm GaSb buffer(10^{18}cm^{-3} ,Te) |
| GaSb substrate(10^{18}cm^{-3} ,Te) |

图 1 具有对称波导结构的 $2\ \mu\text{m}$ InGaAsSb/AlGaAsSb 半导体激光器结构示意图

Fig. 1 Scheme of $2\ \mu\text{m}$ InGaAsSb/AlGaAsSb laser diode with symmetric waveguide

其中 X 为波导层宽度,变化范围为 $0.2\sim 0.8\ \mu\text{m}$.

图 2 为有源区光限制因子与波导层厚度之间的关系.由图 2 可知,有源区限制因子 Γ_{QW} 随着波导层宽度 L_w 的增加而逐渐减小.为了得到较小的 Γ_{QW} ,应选择较大的 L_w .然而,过大的 L_w 将导致多阶模的产生.例如,当波导层宽度为 $0.33\ \mu\text{m}$ 时,将产生 1 阶模.当波导层宽度为 $0.58\ \mu\text{m}$ 时,将产生 2 阶模.

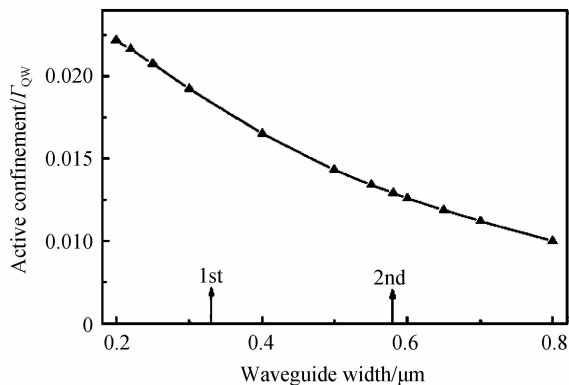


图 2 有源区光限制因子与波导层厚度之间的关系
Fig. 2 The relationship between optical confinement factor and waveguide width

图 3 为波导层宽度为 $1\ \mu\text{m}$ 时,不同模式的光场分布.从图中可以看出,当波导层宽度为 $1\ \mu\text{m}$ 时,在波导结构中存在基模、1 阶模、2 阶模,并且 1 阶模波谷位置、基模与 2 阶模波峰位置恰巧重合在有源区处.

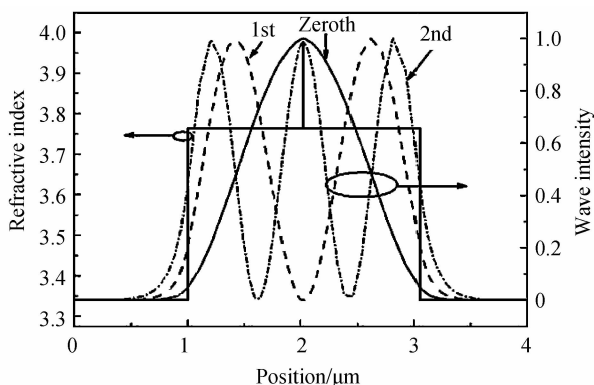


图 3 波导层宽度为 $1\ \mu\text{m}$ 时,不同模式的光场分布以及外延层结构的折射率分布
Fig. 3 Distribution of intensity of optical field and the refractive index of wafer when the waveguide width is $1\ \mu\text{m}$

数值计算可知,1 阶模的有源区限制因子 Γ_{QW} 为 $0.000\ 064$,基模和 2 阶模的 Γ_{QW} 分别为 0.837 和 0.777 .这表明基模和 2 阶模产生了模式竞争,将严重影响器件的出光功率和光学质量.

图 4 为波导层宽度为 $1\ \mu\text{m}$ 时,不同模式的二维光场分布.其中,图 4(a)、(b)、(c)分别是基模、1 阶模、2 阶模在对称波导结构中二维光场模式分布. y 轴是外延结构的生长方向, z 轴是光的传输方向.由于器件结构是对称的,故只显示了器件的右半部分.从图中可以

看出,器件的波导结构有效限制了侧向光场.由于未对器件的横向结构进行设计,横向光场的分布范围较大,且基模、1 阶模、2 阶模的光场在激光横截面分布有明显的不同.高阶模的存在使器件的横向光斑尺寸变大,严重影响了激光器的输出性能.

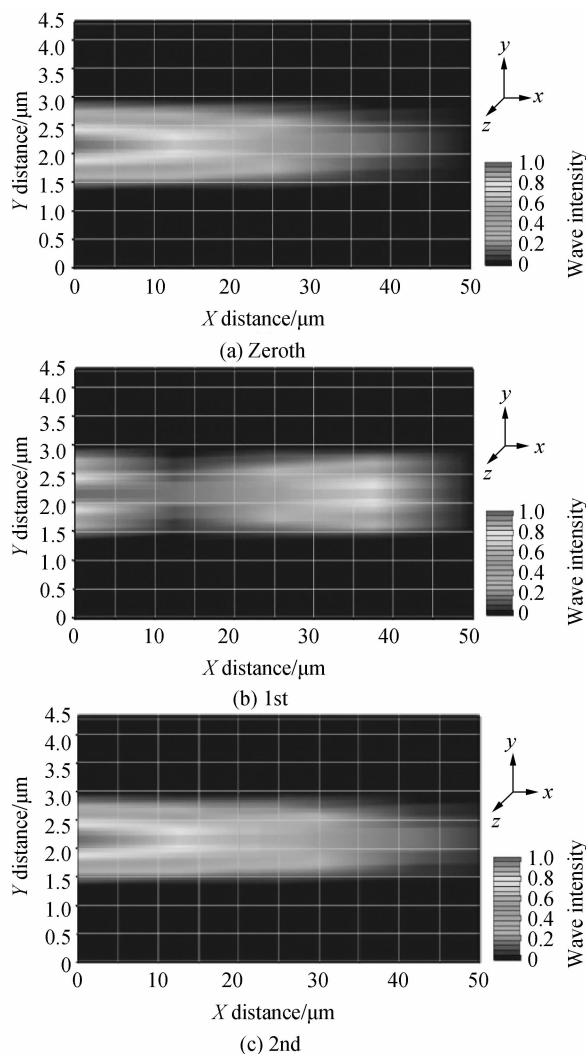


图 4 波导层宽度为 $1\ \mu\text{m}$ 时,不同模式的二维光场分布
Fig. 4 Two-dimensional distribution of intensity of optical field when the waveguide width is $1\ \mu\text{m}$

2 双波导结构设计

单模工作的半导体激光器由于没有其他模式竞争,具有阈值低、光谱窄、光束质量好等优点^[9-10].依据前文内容,当波导层宽度小于 $0.33\ \mu\text{m}$ 时, $2\ \mu\text{m}$ InGaAsSb/AlGaAsSb 半导体激光器将实现单模工作.为了得到较小的 Γ_{QW} ,同时考虑生长条件,将波导层宽度设为 $0.3\ \mu\text{m}$.

尽管对称波导半导体激光器结构简单、易于实现,但是较大的 p 型空穴光吸收系数及较小的空穴迁移率将导致光场与上波导层产生较多的重叠,器件的电阻和内损耗反而增加^[11-12].因此,采用非对称波导结构,

将上波导层设为 $0.1 \mu\text{m}$, 下波导层设为 $0.3 \mu\text{m}$. 具体的结构见图 5(a).

为了进一步避免有源区光场与上波导层重叠, 获得更小的 Γ_{QW} , 提高器件最大输出功率, 减小垂直发散角, 将 $0.3 \mu\text{m}$ 下波导结构设置成双波导结构, 由下至上包括三层结构, 即: $0.1 \mu\text{m}$ $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$ (掺 $\text{Te}; 1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$), $0.1 \mu\text{m}$ $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$ (掺 $\text{Te}; 1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$), $0.1 \mu\text{m}$ 非掺杂 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$ ($x=0.3 \sim 0.9$). 具体结构见图 5(b).

| |
|---|
| 0.2 μm GaSb cap($1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$, Be) |
| 1.5 μm $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}_{0.08}\text{Sb}_{0.92}$ P-cladding($2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, Be) |
| 0.1 μm $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$ Upper-waveguide($x=0.3 \sim 0.8$) |
| 10nm/20nm $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$ QW |
| 0.3 μm $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$ Lower-waveguide($x=0.7 \sim 0.3$) |
| 1.5 μm $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}_{0.08}\text{Sb}_{0.92}$ N-cladding($5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, Te) |
| 0.1 μm GaSb buffer(10^{18}cm^{-3} , Te) |
| GaSb substrate(10^{18}cm^{-3} , Te) |

(a) Asymmetric waveguide

| |
|--|
| 0.1 μm GaSb cap($1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$, Be) |
| 1.5 μm $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}_{0.08}\text{Sb}_{0.92}$ P-cladding($2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, Be) |
| 0.1 μm $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$ Upper-waveguide($x=0.3 \sim 0.8$) |
| 0nm/20nm $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$ QW |
| 0.1 μm $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$ ($x=0.9 \sim 0.3$) |
| 0.1 μm $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$ (10^{17}cm^{-3} , Te) |
| 0.1 μm $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$ (10^{17}cm^{-3} , Te) |
| 1.5 μm $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}_{0.08}\text{Sb}_{0.92}$ N-cladding($5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, Te) |
| 0.1 μm GaSb Buffer(10^{18}cm^{-3} , Be) |
| GaSb substrate(10^{18}cm^{-3} , Te) |

(b) Dual waveguide

图 5 具有不同结构的 $2 \mu\text{m}$ InGaAsSb/AlGaAsSb 半导体激光器结构示意图

Fig. 5 Scheme of $2 \mu\text{m}$ InGaAsSb/AlGaAsSb laser diode with different structural waveguide

3 结果与讨论

利用 SimLastip 软件, 对上述两种波导结构激光器进行数值模拟. 图 6 为 $2 \mu\text{m}$ InGaAsSb/AlGaAsSb 非对称波导结构和双波导结构激光器的光场及外延结构折射率的分布. 从图 6 可以看出, 在非对称波导结构中光场分布只存在一个主峰, 而在双波导结构中光场分

布出现了次峰, 且次峰的位置与双波导位置重合, 有源区的光场被耦合到下波导层, 得到了有效的扩展, 光场模式体积明显增大, 光功率密度减小.

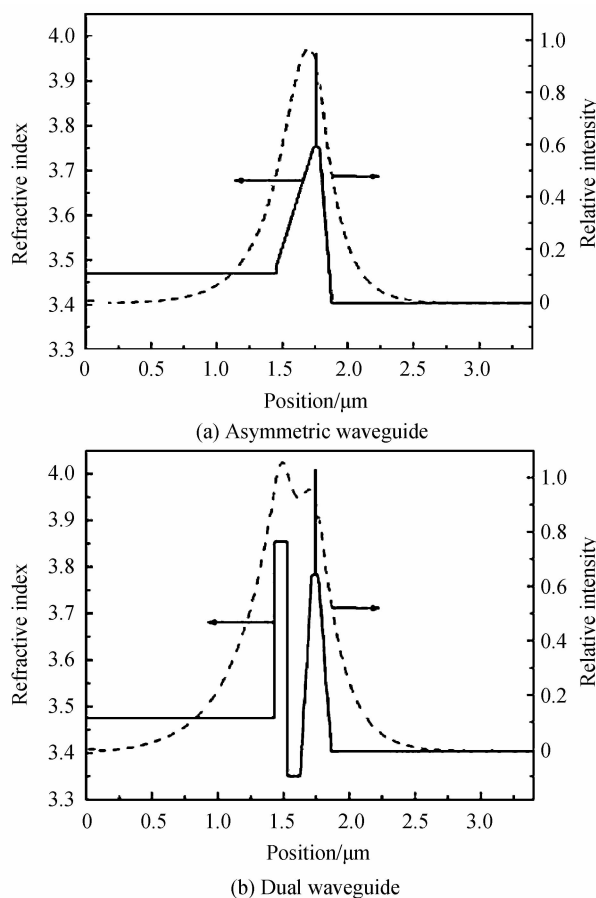


图 6 不同波导结构激光器的光场强度和折射率分布
Fig. 6 Optical field intensity and refractive index with different structural waveguide

另外, 对上述两种结构不同外延层的限制因子进行数值计算, 结果见表 1.

表 1 非对称波导与双波导结构的不同外延层的限制因子
Table 1 Optical confinement factors of various epitaxial layers for asymmetric waveguide and dual waveguide lasers

| | Asymmetric | Dual waveguide |
|----------------------|------------|----------------|
| Γ_{QW} | 0.0192 | 0.0113 |
| Γ_{P} | 0.201 | 0.099 |

从表 1 可以看出, 双波导的有源区限制因子 Γ_{QW} 仅为非对称波导结构的 $3/5$ 左右. 根据式 (1), 其最大输出功率为非对称波导结构激光器的 1.7 倍. 另外, 双波导结构的上波导层限制因子 Γ_{P} 明显小于非对称波导结构, 这表明双波导结构的光场远离了上波导结构, 光场与高掺杂的 p 限制层重叠较少, 由掺杂和自由载流子引起的光吸收损耗减小, 器件的输出特性得到有效改善.

图 7 为具有非对称波导结构和双波导结构的 $2 \mu\text{m}$ InGaAsSb/AlGaAsSb 激光器的远场特性模拟曲线. 从图 7 可以看出, 相对于非对称波导结构, 由于具有双波

导结构的半导体激光器的有源区光场被耦合到了下波导层,光场在 n 型一侧得到有效扩展,远场垂直发散角由 57° 减小到 48° 。

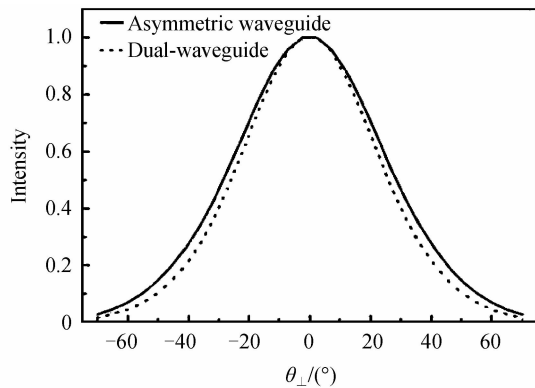


图 7 具有不同波导结构激光器的远场垂直发散角
Fig. 7 Simulated far field vertical divergence angles of different lasers

4 结论

本文利用 SimLastip 软件对条宽为 $50\ \mu\text{m}$ 、腔长为 $1\ 000\ \mu\text{m}$ 、具有不同波导结构的 $2\ \mu\text{m}$ InGaAsSb/AlGaAsSb 半导体激光器进行了数值模拟。在非对称波导结构的研究基础上设计了具有双波导结构的 $2\ \mu\text{m}$ InGaAsSb/AlGaAsSb 半导体激光器,实现了器件结构优化。研究表明:与非对称波导结构相比,具有双波导结构半导体激光器的有源区限制因子由 0.019 2 减小为 0.011 3,最大输出功率提高了 1.7 倍,远场垂直发散角从 57° 减小到 48° 。本文工作为 $2\ \mu\text{m}$ InGaAsSb/AlGaAsSb 半导体激光器实现单模稳定输出、改善器件输出特性提供了指导。

参考文献

[1] AN Ning, LIU Guo-jun, LI Zhan-guo, *et al.* Optimization of the number of quantum wells in the active region for $2\ \mu\text{m}$ laser diode[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, **44**(7): 1969-1974.
安宁,刘国军,李占国,等. $2\ \mu\text{m}$ 半导体激光器有源区量子阱数的优化设计[J]. *红外与激光工程*, 2015, **44**(7): 1969-1974.

[2] TIAN Chao-qun, WEI Dong-han, LIU Lei, *et al.* Etching of GaSb-based materials of mid-infrared semiconductor laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(12): 3363-3366.
田超群,魏冬寒,刘磊,等. 中红外半导体激光器 GaSb 基材

料的刻蚀研究[J]. *红外与激光工程*, 2013, **42**(12): 3363-3366.

[3] SONG Yu-zhi, SONG Jia-kun, ZHANG Yu, *et al.* High power and low loss room-temperature operation of $2.4\ \mu\text{m}$ GaInAsSb/AlGaAsSb type-I strained quantum-well laser diodes[C]. *SPIE*, 2015; **9671**: 96710P.

[4] NEWELL T, WU X, GRAY A L, *et al.* The effect of increased valence band offset on the operation of $2\ \mu\text{m}$ GaInAsSb-AlGaAsSb lasers[J]. *IEEE Photon Technology Letter*, 1999, **11**(1): 30-32.

[5] MERMELSTEIN C, SIMANOWSKI S, MAYER M, *et al.* Room-temperature cw operation of GaInAsSb/AlGaAsSb quantum well diode lasers emitting beyond $2\ \mu\text{m}$ [J]. *IEEE Lasers and Electro-Optics*, 2000, **6784136**: 65.

[6] RATTUNDE M, SCHMITZ J, KAUFEL G, *et al.* GaSb-based $2.4\ \mu\text{m}$ quantum-well diode lasers with low beam divergence and high output power [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **88**(8): 081115.

[7] ZIEGLER M, HEMPEL M, LARSEN H E, *et al.* Physical limits of semiconductor laser operation; A time-resolved analysis of catastrophic optical damage[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **97**(2): 021110.

[8] ALMUHANNA A, ALHARBI A, SALHI A. Waveguide design optimization for long wavelength semiconductor lasers with low threshold current and small beam divergence[J]. *Journal of Modern Physics*, 2011, **2**(04): 225-230.

[9] CAO Chang-qing, ZENG Xiao-dong, FENG Zhe-jun, *et al.* Far-field intensity distributions of high power semiconductor lasers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(sup1): 68-72.
曹长庆,曾晓东,冯喆珺,等. 大功率半导体激光器远场光分布特性[J]. *光子学报*, 2011, **40**(sup1): 68-72.

[10] CHEN Shao-juan, LI Yi, YUAN Wen-rui, *et al.* Improvement of the spectral characteristics of $980\ \text{nm}$ semiconductor laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **44**(1): 0114003.
陈少娟,李毅,袁文瑞,等. $980\ \text{nm}$ 半导体激光器输出光谱特性的改善[J]. *光子学报*, 2014, **44**(1): 0114003.

[11] HE Guo-rong, SHEN Wen-juan, WANG Qing, *et al.* Temperature characteristics of $980\ \text{nm}$ high power vertical cavity surface emitting lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(1): 57-60.
何国荣,沈文娟,王青,等. 高功率 $980\ \text{nm}$ 垂直腔面发射激光器的温度特性[J]. *红外与激光工程*, 2010, **39**(1): 57-60.

[12] WANG Xin, WANG Cui-luan, WU Xia, *et al.* Coupling research of high power single GaAs based semiconductor laser [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, **36**(9): 1018-1021.
王鑫,王翠鸾,吴霞,等. GaAs 基高功率半导体激光 3 器单管耦合研究[J]. *发光学报*, 2015, **36**(9): 1018-1021.