

## 976 nm 锥形半导体激光器结构与优化

孙胜明, 范 杰, 徐 莉, 邹永刚, 马晓辉, 陈琦鹤

(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:** 锥形半导体激光器具有高亮度、高光束质量等特点。通过借助数值模拟仿真软件 Lastip, 优化设计了 976 nm 锥形半导体激光器结构。在低光限制因子  $\Gamma$  条件下, 确定了 InGaAs/AlGaAs 量子阱厚度及非对称波导厚度比值关键参数, 并分析了主振荡器的注入光功率和耦合进锥形区的基侧模衍射分布特性。研究表明: 与传统的单量子阱器件结构相比, 当光限制因子  $\Gamma$  相同均为 2% 时, 在工作电流为 3 A 条件下, 优化设计的非对称双量子阱结构主振荡器的基侧模分布更为集中。其注入光功率由 2.76 W 提升至 3.67 W, 同时耦合进锥形区的基侧模衍射分布更为均匀, 并具有稳定的电光转换效率。

**关键词:** 锥形激光器; 双量子阱; 基侧模; 注入光功率; 衍射分布

**中图分类号:** TN248.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1205004

## Design and optimization of 976 nm tapered semiconductor laser

Sun Shengming, Fan Jie, Xu Li, Zou Yonggang, Ma Xiaohui, Chen Qihe

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

**Abstract:** Tapered semiconductor lasers are characterized by high brightness and high beam quality. With the help of the numerical simulation software Lastip, the structure of 976 nm tapered semiconductor laser was optimized. In the condition of low confinement factor  $\Gamma$ , the InGaAs/AlGaAs quantum wells thickness and the asymmetric waveguide thickness ratio were determined. The inject power of master oscillator (MO) and the diffraction distribution characteristics of the fundamental lateral mode coupled tapered section were analyzed. The results show that, when the operating current is 3 A and the optical confinement factors are 2%, the simulation shows the fundamental lateral mode of the optimized design has more concentrated distribution compared with the conventional 2.67 W of the single quantum well (SQW) structure. The injected optical power was increased from 2.76 W to 3.67 W. And, the diffraction distribution of the fundamental lateral mode coupled into the tapered section was more uniform, the conversion efficiency of MO of optimized structure was more stable.

**Key words:** tapered laser; double quantum well; fundamental lateral mode; inject power; diffraction distribution

收稿日期: 2017-04-10; 修订日期: 2017-05-20

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(201707010); 长春理工大学青年科学基金(XQNJJ-2015-10); 长春理工大学科技创新基金(XJLJG-2016-07)

作者简介: 孙胜明(1991-), 男, 硕士生, 主要从事光电子器件及应用方面的研究。Email: sunshengming23@163.com

导师简介: 徐莉(1962-), 女, 教授, 博士, 主要从事光电子器件及应用方面的研究。Email: xuli@cust.edu.cn

通讯作者: 范杰(1982-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事光电子器件及应用方面的研究。Email: fanjie@cust.edu.cn

## 0 引言

半导体激光器具有质量轻、体积小、电光转化效率高等优点,在工业、军事应用中扮演着越来越重要的角色<sup>[1-6]</sup>。传统的 976 nm 条形半导体激光器作为掺镱光纤激光器泵浦源虽然输出功率较高,但光束质量并不很理想。为提高激光芯片的光束质量,采用锥形结构是一种行之有效的方法。1996年, Walpole<sup>[7]</sup>提出的带有锥形波导的半导体激光器能够产生高亮度连续激光。锥形半导体激光器因其锥形放大器的结构设计,通过适当设计外延层结构可以在一定程度上提高其光束质量。为获得高光束质量输出,锥形半导体激光器通常采用具有较小光限制因子  $\Gamma$  的低模式增益结构设计,其有源区为单量子阱<sup>[8]</sup>。1998年, Walther.M<sup>[8]</sup>等人研究了低模式增益结构能提升锥形半导体激光器光束质量,该结构为单量子阱,具有较小的光限制因子  $\Gamma$  值。2007年, J.M.G.Tijero<sup>[9]</sup>等人的研究表明非对称波导结构有助于提升锥形半导体激光器的光束质量,通过对比分析,单量子非对称结构具有更优的光场模式分布。然而,单量子阱有源层结构的阈值电流偏大、光功率偏小,这些缺点可通过多量子有源层结构抵消。多量子阱有源层结构的采用反之会使光限制因子  $\Gamma$  增大,进而恶化激光器的光束质量。在锥形半导体外延层结构设计中,量子阱数目和光限制因子  $\Gamma$  互为矛盾关系。因此,可用于锥形半导体激光器的多量子阱结构是该领域的研究热点之一。2016年,李景等人<sup>[10]</sup>将双量子阱结构引入到锥形半导体激光器中,制备了波长为 963 nm 的非对称双量子阱高亮度锥形激光器,在工作电流 7 A 时获得了 4.026 W 输出功率。虽然非对称双量子阱锥形半导体激光器已有实验研究报道,但是其与单量子阱锥形半导体激光器相对优势的理论知识报道较少。由于锥形半导体激光器独特的结构设计,脊型主振荡器提供的单侧模会在锥形增益区衍射分布,故在相同光限制因子  $\Gamma$  条件下,单、双量子阱的基侧模对光束质量影响的对比分析具有重要研究意义。

文中优化设计了一种 976 nm 波长  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  非对称双量子阱 (Asymmetric Double

Quantum Well, ADQW)结构,并创新性地理论研究了主振荡器的基侧模特性影响锥形半导体激光器光束质量的物理机制。该结构具有较低的光限制因子,理论上保证了器件具有高的光束质量。与此同时,主振荡器的基侧模分布更为集中,可以有效地提升主振荡器的注入光功率和改善耦合进锥形区的基侧模衍射分布特性,并使锥形半导体激光器具有稳定的电光转换效率。

## 1 理论与分析

### 1.1 量子阱优化设计

文中设计的锥形半导体激光器结构如图 1 所

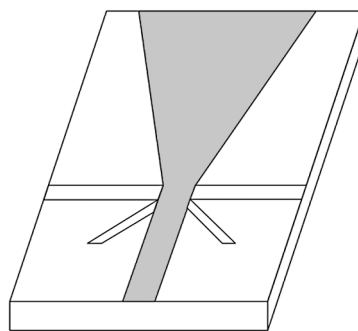


图 1 锥形半导体激光器结构示意图

Fig.1 Illustration of tapered semiconductor laser

示。在半导体激光器中,有源区是激光器的核心部分,它的作用是使载流子的粒子数反转,获得足够的光增益来形成谐振腔内稳定的光振荡。 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  材料体系因其具有微分增益大、低阈值、高输出功率、高调制速率等优点,适合用作高速器件的有源区。作为 QW 材料, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  的 In 组分含量直接影响着光增益谱的分布情况。在阱层和垒层无应变的情况下, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  的 In 组分与带隙宽度的关系为:

$$E_g^0(x) = 1.424 - 1.619x + 0.555x^2 \quad (1)$$

公式(1)表明,随着 In 组分的增加材料带隙宽度变窄,随之增益峰对应波长将会增大。

$\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  材料的带隙宽度为:

$$E_g^0(y) = \begin{cases} 1.424 + 1.27y & (y \leq 0.45) \\ 1.9 + 0.125y + 0.143y^2 & (y > 0.45) \end{cases} \quad (2)$$

当激光波长为 976 nm 时,理论计算获得的  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  材料带隙宽度为 1.136 eV,根据公式(1)

计算得出, In 的组分为 0.19, 综合能带分布情况, 采用  $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  作为垒层材料, 由公式(2)计算得知其带隙宽度为 1.610 eV。

在量子阱中, 由于较薄的阱层宽度, 材料的能带量子化, 因此在设计量子阱时不能仅考虑体材料的禁带宽度对激射波长的影响。国际上研究均表明, 量子阱的阱宽也会对激射波长产生影响。图 2(a)给出了室温下量子阱阱宽对材料增益谱的影响。从图中可以看出, 随着量子阱阱宽由 7 nm 增加至 9 nm, 增益谱峰值对应的波长逐渐由 957 nm 漂移至 969 nm, 增益峰值由  $4\ 918\ \text{m}^{-1}$  降低至  $3\ 982\ \text{cm}^{-1}$ 。此外, 随着量子阱阱宽增加至 9 nm, 增益谱在 875 nm 波长附近开始出现一个峰值, 会对光谱单色性带来影响, 因此不能满足结构设计的要求。

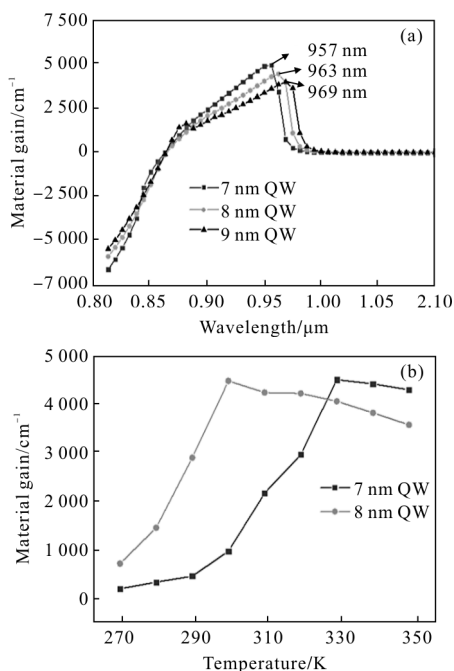


图 2 (a) 不同阱宽厚度增益曲线; (b) 7, 8 nm 阱宽温度增益曲线  
Fig.2 (a) Gain curve of different well thickness; (b) temperature gain curve of 7, 8 nm well thickness

考虑到激光器工作时会因为自生热效应产生波长红移现象, 因此在量子阱的设计中有必要考虑器件温度对增益的影响。图 2(b)给出了不同阱宽时工作温度对 976 nm 波长处增益的影响。如图 2 所示, 在 270~325 K 的温度条件下, 8 nm 阱宽量子阱的 976 nm 波长处增益要高于 7 nm 阱宽量子阱。室温条件 (300 K) 下, 8 nm 阱宽量子阱在 976 nm 波长处光增

益恰能达到最大值, 约为  $4\ 500\ \text{cm}^{-1}$ , 而此时 7 nm 阱宽量子阱的增益仅为  $950\ \text{cm}^{-1}$ 。由此, 确定量子阱的最优阱宽为 8 nm。

### 1.2 波导层厚度优化

决定锥形半导体激光器光束质量的一个重要参数为微分折射率  $\overline{\delta n(n)}$ <sup>[8,11]</sup>, 表达式为:

$$\overline{\delta n(n)} = \delta g_m(n)(i - \alpha) / 2k \quad (3)$$

式中:  $k$  是真空波数, 模式光增益  $g_m(n) = \Gamma g(n)$ , 由材料增益  $g(n)$  和光限制因子  $\Gamma$  的乘积所决定。线宽增强因子  $\alpha$  主要由阱宽和量子阱材料的 In 组分决定。在有源区量子阱参数确定时, 波导层结构的改变不会影响线宽增强因子  $\alpha$ 。因此, 由公式(3)可知, 在量子阱结构参数确定的情况下, 微分折射率仅受光限制因子的影响。具有低微分折射率外延层结构的器件可以减小激光器的自聚焦和丝状发光现象。为获得较好的光束质量, 通常要求锥形半导体激光器外延层结构的光限制因子  $\Gamma \leq 2\%$ <sup>[8,13]</sup>。

非对称结构通过将波导层光场偏置, 可有效降低有源层的光限制因子  $\Gamma$ 。图 3 为波导层厚度比值 ( $d_N + d_P$ ) 和单量子阱 (SQW)、双量子阱 (DQW) 以及三量子阱 (TQW) 结构光限制因子的关系。

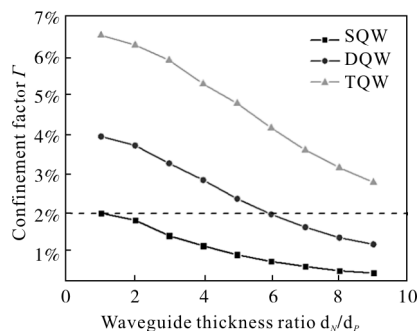


图 3 SQW、DQW、TQW 结构的光限制因子  $\Gamma$  的关系图 ( $d_N + d_P = 3\ \mu\text{m}$ )

Fig.3 Optical confinement factor  $\Gamma$  of SQW、DQW、TQW structure ( $d_N + d_P = 3\ \mu\text{m}$ )

由图 3 可以看出单量子阱、双量子阱以及三量子阱结构的光限制因子  $\Gamma$  均随着波导层厚度比值  $d_N + d_P$  的增大逐渐减小。单量子阱有源层结构光限制因子  $\Gamma$  始终  $\leq 2\%$ , 而双量子阱有源层结构只有在波导层比值  $d_N + d_P \geq 6$  时, 光限制因子  $\Gamma$  才会  $\leq 2\%$ 。三量子阱层结构则在  $d_N + d_P$  增加至 9 时  $\Gamma$  仍然大于  $2\%$ 。图 4 为优化后的 976 nm 锥形半导体层结构参数。

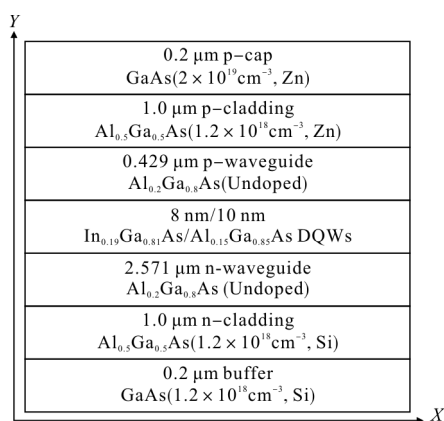


图 4 优化的 976 nm 非对称双量子阱外延层结构示意图  
Fig.4 Optimization of 976 nm ADQW epitaxial structure

## 2 模拟与讨论

在锥形半导体激光器中,主振荡器的主要作用是提供单模的光注入,脊宽不能过宽,通常约为 4~8 μm,且脊宽与锥形区注入端宽度大多匹配<sup>[11]</sup>。通常脊型主振荡器中耦合进锥形区用来放大的功率为注入光功率。

在保证基侧模注入到锥形区的情况下,图 5 给出了 3 A 工作电流状态下,单量子阱和双量子阱有源层结构主振荡器注入锥形区的光功率。由图 3 可知,因双量子阱有源层结构只有在波导层厚度比值  $d_N+d_P \geq 6$  时,才满足光限制因子  $\Gamma \leq 2\%$ ,故只对此条件下 ADQW 层结构进行模拟。如图 5 所示,双量子阱有源层结构注入光功率随着波导层比值  $d_N+d_P$  由 6 增大至 9 而缓慢减小;而随着波导层比值  $d_N+d_P$  由 1 增加至 5,单量子阱有源层结构的注入光功率提高到约 3 350 mW,而后随着  $d_N+d_P$  的进一步增加注入光功率缓慢减小。同时双量子阱有源层结构的注入光功率始

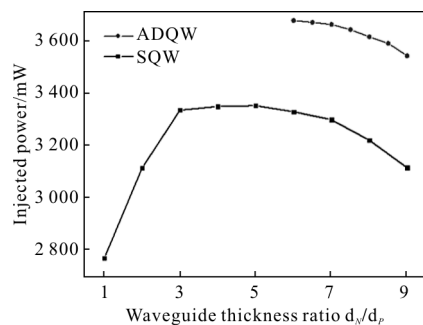


图 5 单、双量子阱层结构注入光功率关系图  
(主振荡器脊宽为 8 μm)

Fig.5 Inject power of SQW, ADQW structure(Main oscillator ridge width is 8 μm)

终大于单量子阱层结构。因此在保证光限制因子  $\Gamma \leq 2\%$  的条件下,相比于单量子阱结构,双量子阱有源层结构可以有效地提高主振荡器的注入光功率。

由公式(3)可知,决定光束质量的重要参数之一为光限制因子  $\Gamma$ 。由图 3 可知,对称单量子阱(SQW)有源层结构和波导层比值  $d_N/d_P$  为 6 的 ADQW 有源层结构具有相同的光限制因子  $\Gamma$ 。

在保证光限制因子  $\Gamma$  均为 2% 的条件下,图 6 分析了 SQW 结构和 ADQW 结构( $d_N+d_P=6$ )主振荡器基侧模分布情况。通过对比图 6 可以看出,在 X 轴方向,ADQW 有源层结构基侧模强度分布较为集中。图 7 中的数据表明,SQW 有源层结构的注入光功率约为基

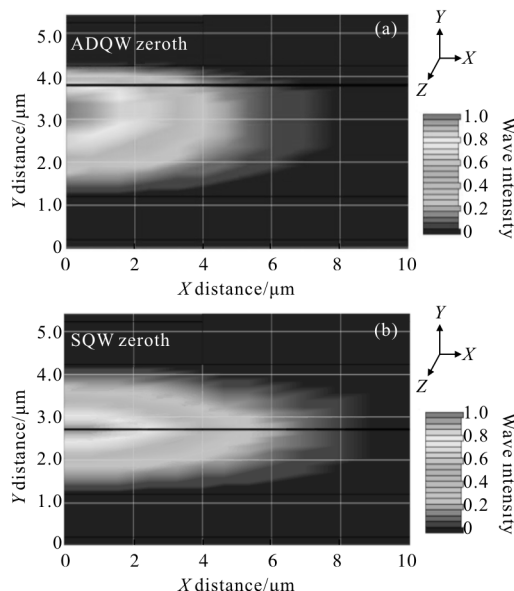


图 6 光限制因子  $\Gamma=2\%$ ,单量子阱( $d_N/d_P=1$ )与双量子阱( $d_N/d_P=6$ )结构基侧模光强分布

Fig.6 Optical confinement factor  $\Gamma=2\%$ ,fundamental lateral mode intensity of SQW, ADQW structure

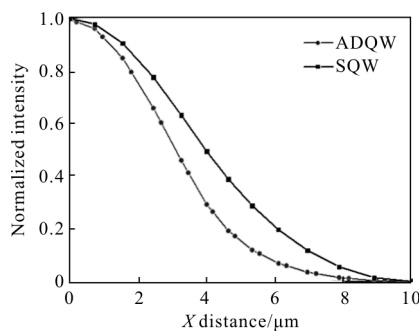


图 7 光限制因子  $\Gamma=2\%$ ,单、双量子阱层结构基侧模归一化强度分布

Fig.7 Optical confinement factor  $\Gamma=2\%$ ,fundamental lateral mode normalized intensity of SQW, ADQW structure

侧模功率的 76.9%, 而 ADQW 有源层结构的注入光功率约为基侧模功率的 87.5%。由此证明 ADQW 层结构可以有效地提高主振荡器的注入光功率。

ADQW 结构对主振荡器基侧模强度分布的影响将直接改变锥形区内的衍射特性。图 8 给出了图 6 中两种基侧模在锥形区的衍射强度分布。对比图 8(a)和图 8(b)可以看出, 在锥形角度为  $4^\circ$  的情况下, ADQW 结构的基侧模在锥形区内衍射分布呈均匀的高斯分布, 而 SQW 结构的基侧模在锥形区内衍射分布则出现多个峰值。锥形区内衍射分布的多个峰值将对最终出光带来高阶模影响<sup>[13]</sup>。表明 ADQW 结构主振荡器提供的基侧模要优于 SQW 结构。

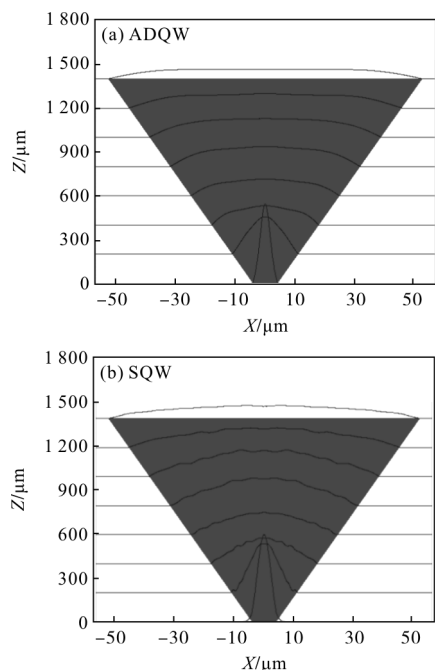


图 8 光限制因子  $\Gamma=2\%$ , (a) 单量子阱基侧模锥形区衍射强度分布; (b) 双量子阱基侧模锥形区衍射强度分布

Fig.8 Optical confinement factor  $\Gamma=2\%$ , (a) diffraction distribution of the fundamental lateral mode coupled tapered area of SQW, ADQW; (b) diffraction distribution of the fundamental lateral mode coupled tapered are of ADQW

图 9 对比了光限制因子  $\Gamma=2\%$  时, SQW 和 ADQW 层结构的主振荡器电光转换效率。如图所示, 随着电流的增加, 具有 SQW 有源层结构的主振荡器电光转换效率逐渐降低, 而 ADQW 有源层结构引入令主振荡器具有更高效、稳定的电光转换效率。与 SQW 有源层结构中上波导层限制因子  $\Gamma_p=49.57\%$

相比, ADQW 有源层结构中的  $\Gamma_p$  降低至 8.25%, 这表明 ADQW 有源层结构中光场与高掺杂的 P 限制层重叠较少, 降低了由掺杂和自由载流子导致的光吸收损耗, 从而具有相对稳定高效的电光转换效率。

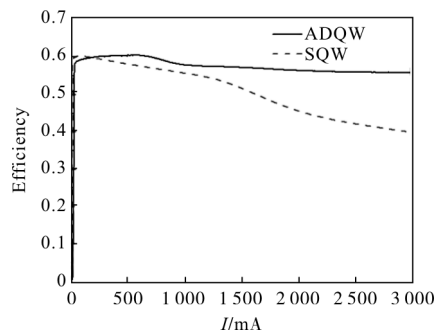


图 9 SQW、ADQW 层结构主振荡器电光转化率

Fig.9 Conversion efficiency of SQW, ADQW structure (Confinement factor  $\Gamma=2\%$ )

### 3 结论

文中优化设计了一种 976 nm 锥形半导体激光器结构, 该结构采用双量子阱有源层结构设计以提高注入光功率, 采用非对称波导结构抑制双量子阱结构对光场限制因子的提升作用。借助数值模拟仿真软件 Lastip 优化了量子阱有源区阱层 In 组分和厚度参数, 分析了非对称波导双量子阱结构对锥形半导体激光器主振荡器基侧模和注入光功率特性的影响。研究表明, 在光限制因子  $\Gamma$  为 2% 条件下, 与传统的对称单量子阱相比, 非对称波导双量子阱结构可以令锥形半导体激光器中的主振荡器具有更高的注入光功率和更为集中的基侧模分布, 由此获得了良好的锥形区基侧模衍射分布, 从而降低了高阶模对光束质量的影响。与此同时, 非对称波导双量子阱结构还令主振荡器具有更稳定的电光转换效率。文中的研究作为高亮度锥形半导体激光器进一步的实物研制奠定了理论基础。

### 参考文献:

[1] Zhao Yuan'an, Hu Guohang, Liu Xiaofeng, et al. Laser conditioning technology and its applications [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(12): 2938-2947. (in Chinese)

[2] Xu Zhengping, Shen Honghai, Xu Yongsun. Review of the development of laser active imaging system with

- direct ranging [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8 (1): 28–38. (in Chinese)
- [3] Liu Youqiang, Cao Yinhua, et al. 5 kW fiber coupling diode laser for laser processing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(5): 1279–1287. (in Chinese)
- [4] Zeng Fei, Gao Shijie, San Xiaogang, et al. Development status and trend of airborne laser communication terminals[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(1): 0065. (in Chinese)
- [5] Yang Guang, Liu Huanhuan, Zhou Jiaping, et al. Research on laser deposition repair aircraft vertical tail beam[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0206004. (in Chinese)
- [6] Ma Yufei, He Ying, Yu Xin, et al. Research progress of laser source used in laser induced plasma ignition[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(11): 1136003. (in Chinese)
- [7] Walpole J N. Semiconductor amplifiers and lasers with tapered gain regions [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1996, 28(6): 623–645.
- [8] Walther M, Kiefer R. Improved beam quality for high-power tapered laser diodes with LMG(low-modal-gain) epitaxial layer structures [C]//Proceedings of SPIE–the International Society for Optical Engineering, 1998, 1117(12): 304433.
- [9] Tijero J M G, Odriozola H, Borrueal L, et al. Enhanced brightness of tapered laser diodes based on an asymmetric epitaxial design [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(20): 1640–1642.
- [10] Li Jing, Qiu Yuntao. High brightness tapered diode laser [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, 37 (8): 990–995. (in Chinese)
- [11] Wei Xing. Near diffraction limited high power tapered semiconductor lasers [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2006. (in Chinese)
- [12] Li Jing, Qiu Yuntao. Photoetching of tapered diode laser wafer[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, 37(12): 1502–1506. (in Chinese)
- [13] Müller A, Fricke J, Bugge F, et al. DBR tapered diode laser with 12.7 W output power and nearly diffraction-limited, narrowband emission at 1 030 nm [J]. *Applied Physics B*, 2016, 122(4): 1–6.