

# 具有线性张角结构和非线性张角结构的锥形激光放大器的分析

曾德圣<sup>1,2</sup>, 仲莉<sup>1\*</sup>, 刘素平<sup>1</sup>, 马晓宇<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院半导体研究所光电子器件国家工程中心, 北京 100083;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 利用分步傅里叶算法求解锥形半导体激光放大器中的稳态行波方程, 对线性张角结构和非线性张角结构波导形状的激光放大器进行光学和热学性质的数值模拟。通过比较两种结构的激光放大器的输入电流-输出功率曲线, 输入功率-输出功率曲线和光丝形成数量, 研究放大器中光丝的形成机理, 解释两种激光放大器中不同光场分布的原因。结果表明, 非线性张角结构的放大器不仅能使增益分布和光场分布更契合, 而且能减小波导边缘反射光和入射光的耦合, 所以有着更高的光光转换效率和更稳定的模式输出。

**关键词** 激光技术; 锥形激光放大器; 分步傅里叶算法; 光学和热学性质; 光场模式; 光丝

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0314002

## Analysis of Tapered Laser Amplifiers with Linear and Nonlinear Angle-Opening Structures

Zeng Desheng<sup>1,2</sup>, Zhong Li<sup>1\*</sup>, Liu Suping<sup>1</sup>, Ma Xiaoyu<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Engineering Center for Optoelectronic Device, Institute of Semiconductors,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Using the split-step Fourier method to solve the steady state traveling wave equation of tapered semiconductor laser amplifier, the optical and thermal characteristics of two kinds of laser amplifiers (with linear and nonlinear angle-opening structures) were analyzed by numerical simulation. By comparing the input current-output power curve, input power-output power curve and the number of filaments of the two laser amplifiers, the formation mechanism of filaments in the amplifiers was studied, and the reason of the different optical field distribution in the two laser amplifiers was explained. Results show that the nonlinear angle-opening structure can not only make the gain distribution more consistent with the optical field distribution, but also reduce the coupling between the reflected light and incident light at the edge of the waveguide. Furthermore, the tapered laser amplifier with nonlinear angle-opening structures has a higher optical-optical conversion efficiency and a more stable mode output.

**Key words** laser technique; tapered laser amplifier; split-step Fourier algorithm; optical and thermal characteristics; light field mode; filament

**OCIS codes** 140.3280; 140.3430; 140.5960

## 1 引 言

具有锥形结构的大功率端面发射半导体激光放大器由于在通信、材料加工、激光泵浦等许多领域中不可替代的作用而引起广泛关注<sup>[1-2]</sup>。由于锥形激光放大器增益区的横向宽度不断(线性)增加, 输入光在没有横向反射的情况下能自由地衍射传播, 从

而保持其横向模式特性<sup>[3]</sup>。传统的锥形半导体激光放大器的增益区域是线性张角结构, 即增益区宽度线性增加, 在许多已发表的论文<sup>[4-7]</sup>中已经对此在理论和实验上进行了详细的分析。近年来, 有学者研究了许多新的结构。Friedmann 等<sup>[8]</sup>将锥形激光放大器的谐振器长度从 2 mm 扩展到了 5 mm, 该放大器在 976 nm 波长情况下, 输出功率提高到了

收稿日期: 2019-08-29; 修回日期: 2019-09-20; 录用日期: 2019-10-12

\* E-mail: zhongli@semi.ac.cn

10 W,在近衍射极限情况下,输出功率是 8 W。2016年, Ji等<sup>[9]</sup>设计并分析了非线性张角的780 nm窄线宽锥形激光放大器结构,该放大器功率高且频率稳定。2019年, Pérez-Serrano等<sup>[7]</sup>分析了具有非对称功率放大区域的锥形激光放大器,其结构可有效地放大种子源信号,同时可减少来自输出面的反射光的影响。但是各种非线性效应引起的光丝一直制约着大功率激光器输出功率的提升,因此很多方法被提出以抑制光丝的产生,包括增加光栅、刻蚀破坏凹槽、以光子晶体作为波导层等,其中优化改进增益区结构是一种十分有效的途径。

数值模拟和分析在优化器件结构和创建新颖设计概念方面发挥着重要作用,许多已发表的文章描述了锥形激光放大器的动态或静态模型。为了求解动态或静态行波方程,一种简单而有效的方法是:考虑到器件的纵向长度和横向宽度远大于有源层厚度,使用有效折射率法,将三维问题转换为二维平面问题<sup>[6,10-12]</sup>。Sujecki等<sup>[13]</sup>建立准三维热电模型,利用广角有限差分光束传播方法求解半导体中的稳态

行波方程,该方法被广泛使用。除此之外,分步傅里叶(SSF)算法是解决非线性薛定谔方程的传统方法,该算法计算速度快、程序编写简洁,被用于分析半导体中的波动方程<sup>[14-15]</sup>。本文将使用SSF算法求解稳态行波方程,通过分析锥形增益区为线性张角结构和非线性张角结构两种不同的锥形激光放大器的光学性质和热学性质,包括空间烧孔现象<sup>[16]</sup>、热透镜现象<sup>[17]</sup>和光丝形成的原因,以及比较这两种结构对光场传播的影响,从而比较两种结构的优劣。

## 2 模型描述

两种几何结构的锥形激光放大器分别如图1和图2所示。

图1中锥形激光放大器的张角为 $6^\circ$ 。图2中锥形增益区的宽度规律变化来源于经验公式<sup>[18]</sup>,即

$$W(z) = W_0 + (W_{\max} - W_0) \frac{z_{\max} + b}{z_{\max}^2} \times \frac{z^2}{z + b}, \quad (1)$$

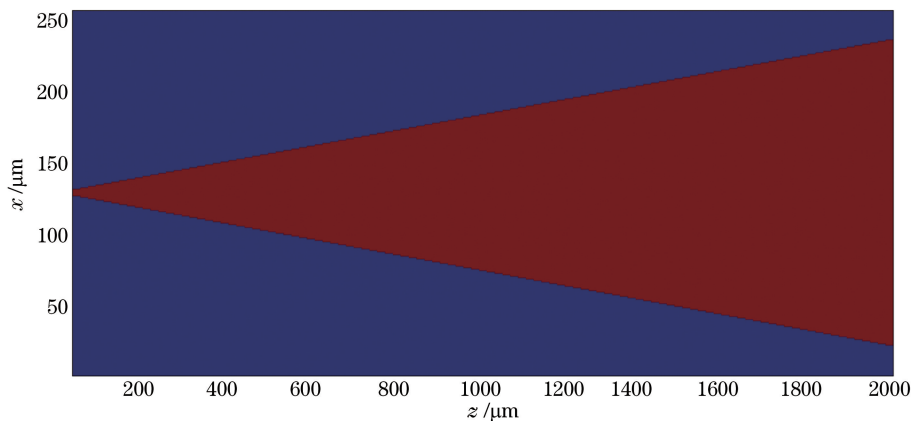


图1 具有线性张角结构的锥形激光放大器

Fig. 1 Tapered laser amplifier with linear angle-opening structure

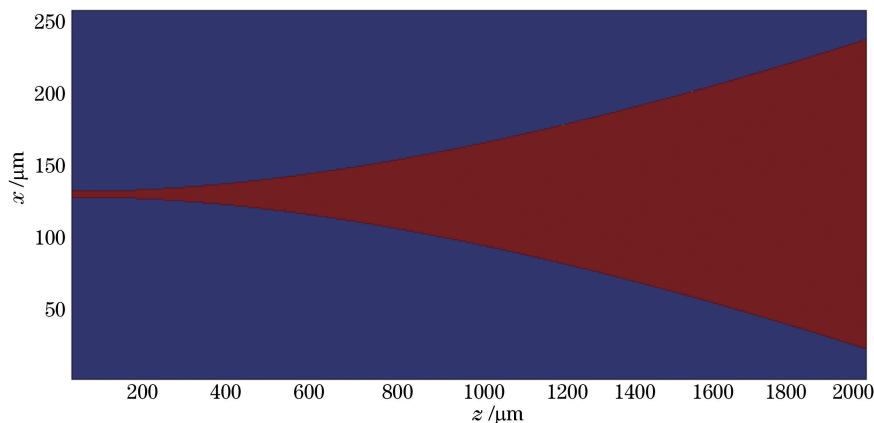


图2 具有非线性张角结构的锥形激光放大器

Fig. 2 Tapered laser amplifier with nonlinear angle-opening structure

式中: $W$  为增益区的半宽度; $z$  为纵向长度; $b$  为常数,用来控制边缘曲率。根据 Kristjánsson 等<sup>[19]</sup> 的分析, $b$  选为 4。

输入光在放大器中传播时,由于空间烧孔效应(SHB)和热透镜效应等非线性效应的影响,光波不能像在真空中传播一样自由传播。线性张角结构放大器的增益分布与器件中的光场分布不能很好地契合,图 3 显示线性张角结构放大器的光场有部分溢

出,在波导边缘发生了反射和透射。图 4 显示非线性张角结构放大器的光强和增益分布,光波基本上没有溢出波导边缘,与增益分布十分契合。通过两种结构光强分布和对应增益分布的对比图可以看出,非线性张角结构放大器的增益分布更加契合光强分布,而且能降低入射光和波导边缘反射光的耦合。利用缓变包络近似,半导体激光放大器中的波动方程为

$$\frac{\partial E(x, z)}{\partial z} = -iD_f \frac{\partial^2 E(x, z)}{\partial x^2} + \left[ \frac{g(x, z)(1 - i\alpha) - \alpha_i}{2} - ik_0 \alpha_T T(x, z) \right] E(x, z), \quad (2)$$

式中: $D_f$ 、 $g(x, z)$ 、 $\alpha$ 、 $\alpha_i$ 、 $\alpha_T$  分别为光场侧向扩散系数、增益函数、线宽增强因子、内损失系数、热指数系数; $D_f = \lambda_0 / (4\pi n)$ ,  $n$  为背景折射率。对于增益函数,由于增益饱和效应的影响,光强达到一定程度时,模式增益会随着光强的增加而减少<sup>[20]</sup>,可以表达为

$$g(x, z) = \frac{g_{\text{unsat}}}{1 + \frac{P(x, z)}{P_{\text{sat}}}}, \quad (3)$$

式中: $g_{\text{unsat}} = \Gamma\beta[J(x, z) - J_0]$ ,  $\Gamma$  为模式填充因子, $\beta$  为微分增益效率, $J(x, z)$ 、 $J_0$  分别为注入电流密度和透明电流密度; $P(x, z)$  为功率密度; $P_{\text{sat}}$  为饱和功率密度。对于热学模型,根据 Lang 等<sup>[20]</sup> 的分析,温度  $T(x, z)$  由一维热脉冲响应函数和局部热载荷的卷积确定,该模型综合考虑了横向热扩散、欧姆热效应和光子冷却等因素,但没有考虑放大的自发辐射(ASE)和光子散射导致的热运输,即纵

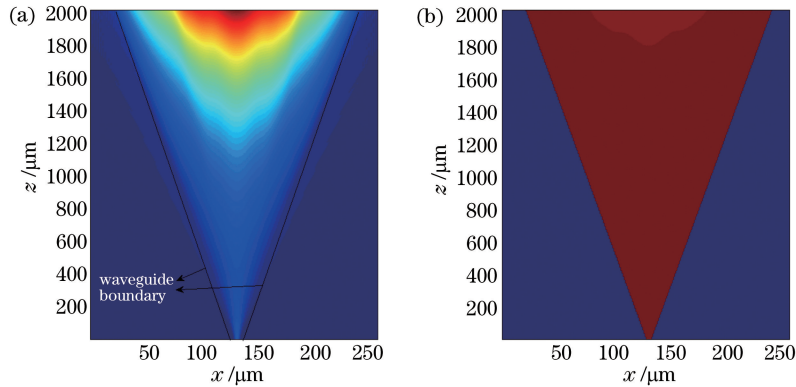


图 3 输入电流为 1 A 时,线性张角结构放大器中的光强和增益分布。(a)光强分布;(b)增益分布

Fig. 3 Light intensity distribution and gain distribution in amplifier with linear angle-opening structure when input current is 1 A. (a) Light intensity distribution; (b) gain distribution

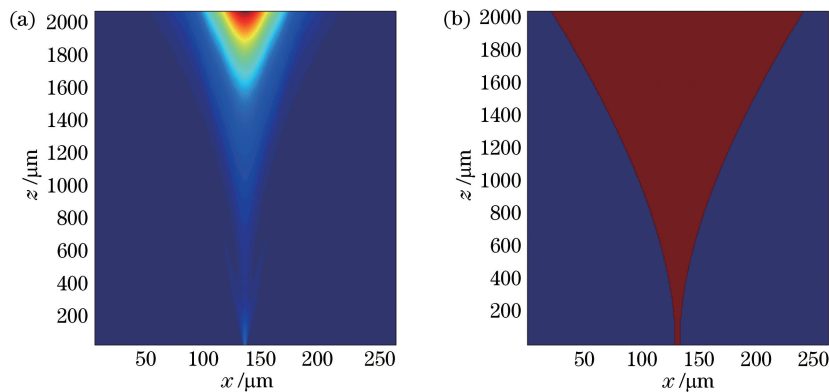


图 4 输入电流为 1 A 时,非线性线性张角结构放大器中的光强和增益分布。(a)光强分布;(b)增益分布

Fig. 4 Light intensity distribution and gain distribution in amplifier with nonlinear angle-opening structure when input current is 1 A. (a) Light intensity distribution; (b) gain distribution

向热扩散效应,这是因为 ASE 产生的热量很小,可以忽略不计,而且相比于非饱和吸收效应,光子散射热量也非常小。对于(1)式的求解,本文采用 SSF 算法,将等式右边分为线性项和非线性项两个部分,在傅里叶空间中求解线性项,然后通过傅里叶逆变换,在实空间中求解非线性项。解法过程为

$$\frac{\partial E(x, z)}{\partial z} = (\hat{D} + \hat{N})E(x, z), \quad (4)$$

$$\hat{D}E(x, z) = -iD_t \frac{\partial^2 E(x, z)}{\partial x^2}, \quad (5)$$

$$\hat{N}E(x, z) = \left[ \frac{g(x, z)(1 - i\alpha) - \alpha_i}{2} - ik_0\alpha_T T(x, z) \right] E(x, z), \quad (6)$$

得到的递推关系式为

$$E(x, z + \Delta z) = F^{-1} \{ \exp(iD_t \omega_x^2 \Delta z) F [ \exp(i\Delta z \hat{N}) E(x, z) ] \}, \quad (7)$$

式中: $F^{-1}$ 为傅里叶逆变换; $\omega_x$ 为空间频谱。

表 1 为示例装置的参数,这些参数的值是从实验或文献中得到,在研究某些因素的影响时,可在每

个案例中更改这些参数。在进行数值分析时,选取束腰半径为  $2 \mu\text{m}$  的高斯光束作为输入光场,网格横向宽度选择  $1 \mu\text{m}$ ,纵向长度选为  $4 \mu\text{m}$ 。

### 3 仿真结果和分析

#### 3.1 输出功率分析比较

分析比较两种激光放大器的输入电流-输出功率曲线,输入功率-输出功率曲线。从图 5 发现,具有非线性张角结构的放大器的斜率与线性张角结构的放大器相同,但是前者有着更低的阈值电流和更高的光光转换效率,放大能力更强。这是因为输入光在放大器中传播时,由于 SHB 和热透镜效应等一系列非线性效应的影响,光波不能像在真空中传播一样自由传播。相比于线性张角结构放大器,非线性张角结构放大器的增益分布能更好地契合器件中的光场分布。

#### 3.2 光丝形成分析

光丝现象是制约大功率激光器和放大器发展的一大瓶颈,已经有很多文章在理论和实验上对此进行了详细的分析,在此将结合仿真结果讨论光丝在两种张角结构放大器中的影响。

表 1 模拟仿真的参数

Table 1 Parameters in simulation

Parameter	Value	Parameter	Value
Beam waist radius $\omega_0/\mu\text{m}$	2	Transparency current density $J_0/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	200
Central wavelength $\lambda_0/\text{nm}$	980	Internal quantum efficiency $\eta_{\text{int}}$	0.98
Effective index $n_{\text{eff}}$	3.34	Linear loss $\alpha_i/\text{cm}^{-1}$	5
Effective differential gain $\Gamma\beta/(\text{cm} \cdot \text{A}^{-1})$	0.093	Index thermal coefficient $\alpha_T/\text{K}^{-1}$	0.000334

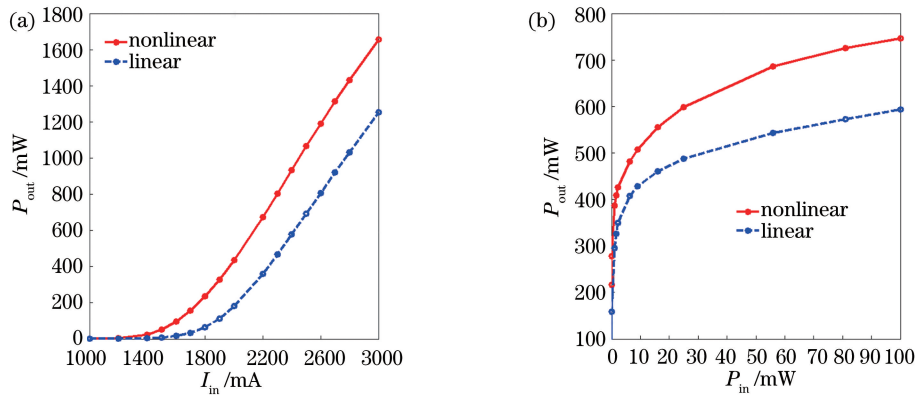


图 5 输出功率与输入电流和输入功率的关系。(a)输入电流-输出功率曲线图;(b)输入功率-输出功率曲线图

Fig. 5 Relations among output power, input current, and input power. (a) Input current-output power curve; (b) input power-output power curve

当放大器中光强比较弱时,增益未达到饱和,所以不会产生 SHB,产热量也很低,不会形成热透镜现象。图 6 和图 7 分别为在输出功率约为 0.1 W 时

两种放大器中的光强分布。由于增益分布均匀,可以看到输入光被放大,而且和输入的高斯光束相比,两种器件的输出模式没有发生太大的改变。

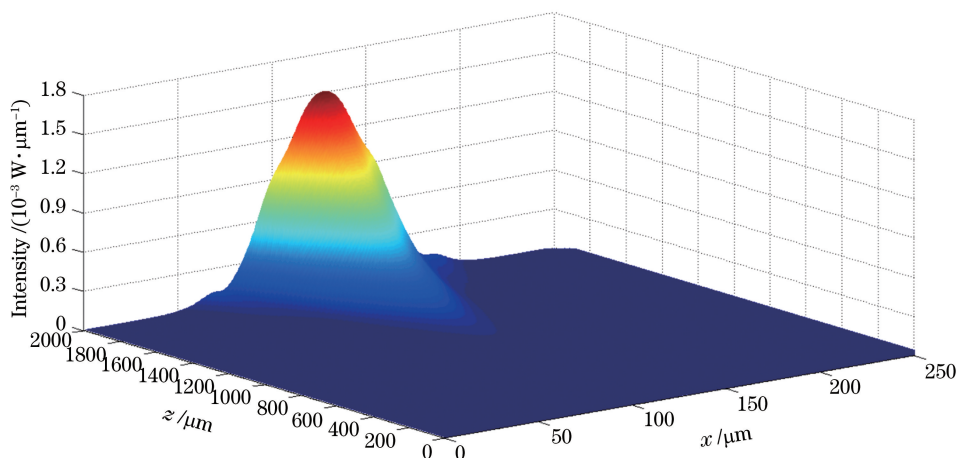


图 6 非线性张角结构放大器在低功率输出时的光强

Fig. 6 Intensity in amplifier with nonlinear angle-opening structure at low output power

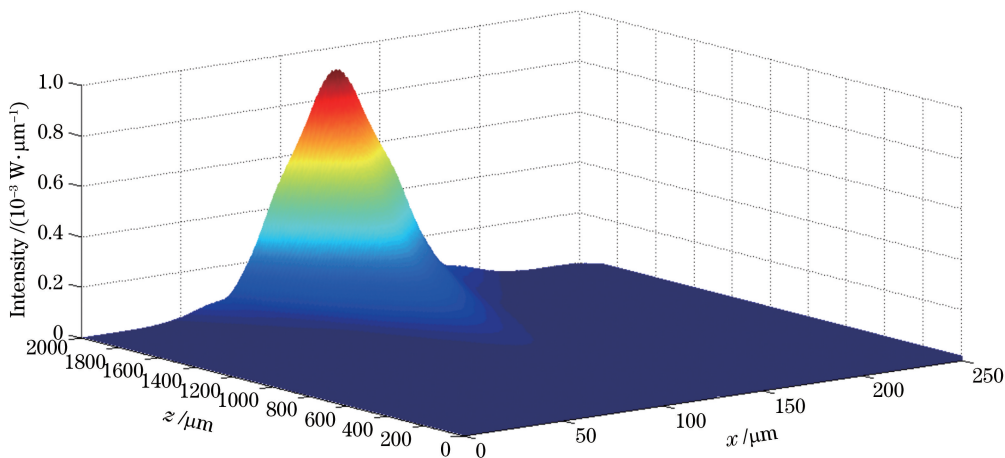


图 7 线性张角结构放大器在低功率输出时的光强

Fig. 7 Intensity of amplifier with linear angle-opening structure at low output power

随着注入电流的增加,器件中光强增大,当光强达到最大时,所在区域的增益会发生显著减小,出现 SHB,同时热量上升,导致局部区域的折射率发生降低,形成局部波导,从而光向高折射率区域聚集,光强急剧增加,导致光丝产生。光丝能极大地影响输入光的模式特性,造成输出光的光束质量降低。图 8 给出了在输出功率约为 1 W 时,两种放大器在长度为 1600  $\mu\text{m}$  处的光强分布和增益的侧向分布。可以看到在光强大的区域,增益小且伴有光丝,这是 SHB 和热透镜效应导致的。对比图 8 中的光强分布可以发现,线性张角结构的放大器在波导边缘 ( $x=50 \mu\text{m}$  和  $x=200 \mu\text{m}$ ) 处的光强明显大于非线性张角结构放大器的光强,这是因为非线性张角结构放大器的张角是不断增加的,降低了输入光和边

缘反射光的耦合作用,而且非线性张角结构放大器的增益侧向分布变化更加平缓,所以光丝的数量较少,光丝强度也更低,输出模式更加稳定,模拟结果与分析基本吻合。

## 4 结 论

通过计算机仿真模拟,对比分析了两种锥形激光放大器结构对器件中的光场分布的影响。结果表明,相比于线性张角结构的锥形激光放大器,非线性张角结构的锥形激光放大器更加契合输入光在光场中的传播,同时能降低输入光和波导边缘处反射光的耦合作用。通过输入电流-输出功率曲线和输入功率-输出功率曲线可以看到,非线性结构放大器的光光转换效率和放大能力要强于线性结构的放大



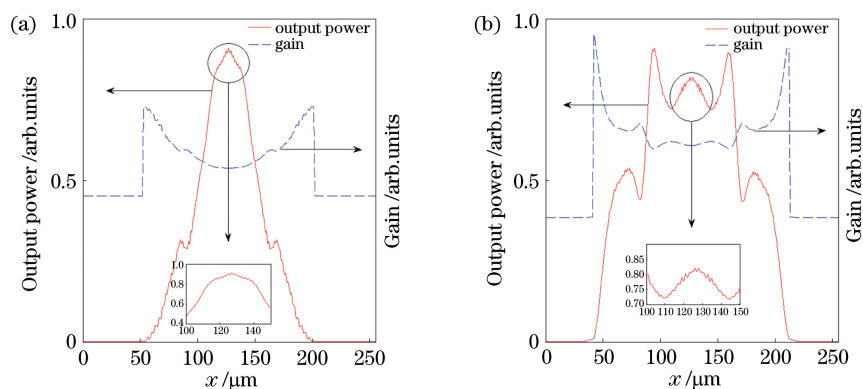


图 8  $z=1600 \mu\text{m}$  时不同结构的光强和增益侧向分布。(a)非线性张角结构;(b)线性张角结构

Fig. 8 Intensity and gain lateral distribution in different angle-opening structures when  $z=1600 \mu\text{m}$ .

(a) Nonlinear angle-opening structure; (b) linear angle-opening structure

器,通过功率和增益曲线可以看到,非线性张角结构的放大器对光丝的抑制作用强于线性张角结构的放大器。本文模型没有考虑到光波的端面反射和载流子侧向扩散效应,但是通过简单分析可以发现,非线性张角结构放大器对端面反射光和入射光的耦合的抑制作用也明显高于线性张角结构放大器,所以本文结论在考虑端面反射光后仍然成立。

### 参 考 文 献

- [1] Sun S M, Fan J, Xu L, et al. Progress of tapered semiconductor diode lasers [J]. Chinese Optics, 2019, 12(1): 48-58.  
孙胜明, 范杰, 徐莉, 等. 锥形半导体激光器研究进展[J]. 中国光学, 2019, 12(1): 48-58.
- [2] Zhou X Y, Zhao S Y, Ma X L, et al. Low vertical divergence angle and high brightness photonic crystal semiconductor laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0201010.  
周旭彦, 赵少宇, 马晓龙, 等. 低垂直发散角高亮度光子晶体半导体激光器[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0201010.
- [3] Walpole J N. Semiconductor amplifiers and lasers with tapered gain regions [J]. Optical and Quantum Electronics, 1996, 28(6): 623-645.
- [4] Yao C, Xu T H, Wan W J, et al. Single-mode tapered terahertz quantum cascade lasers with lateral gratings [J]. Solid-State Electronics, 2016, 122: 52-55.
- [5] Spreemann M, Lichtner M, Radziunas M, et al. Measurement and simulation of distributed-feedback tapered master-oscillator power amplifiers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2009, 45(6): 609-616.
- [6] Egan A, Ning C Z, Moloney J V, et al. Dynamic instabilities in master oscillator power amplifier semiconductor lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1998, 34(1): 166-170.
- [7] Pérez-Serrano A, Tijero J M G, Balle S, et al. Numerical analysis of the modulation dynamics in an integrated three-section MOPA using a voltage driven traveling-wave model [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2019, 25(6): 3000110.
- [8] Friedmann P, Gilly J, Schleife J, et al. High efficiency frequency stabilized tapered amplifiers with improved brightness [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7918: 79180B.
- [9] Ji E C, Liu Q, Nie M M, et al. Theoretical and experimental analysis of high-power frequency-stabilized semiconductor master oscillator power-amplifier system [J]. Applied Optics, 2016, 55(11): 2909-2914.
- [10] Radziunas M, Fuhrmann J, Zeghuzi A, et al. Efficient coupling of dynamic electro-optical and heat-transport models for high-power broad-area semiconductor lasers [J]. Optical and Quantum Electronics, 2019, 51(3): 69.
- [11] Ning C Z, Indik R A, Moloney J V. Effective Bloch equations for semiconductor lasers and amplifiers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1997, 33(9): 1543-1550.
- [12] Borrueil L, Sujecki S, Moreno P, et al. Quasi-3-D simulation of high-brightness tapered lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2004, 40(5): 463-472.
- [13] Sujecki S, Borrueil L, Wykes J, et al. Nonlinear properties of tapered laser cavities [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2003, 9(3): 823-834.
- [14] Li J, Qiu Y T, Cao Y H, et al. Numerical simulation of filamentation induced by waveguide in

- semiconductor taper amplifiers [J]. *Optik*, 2019, 176: 711-715.
- [15] Li J, Qiu Y T, Cao Y H, et al. Numerical simulation and experiment of high brightness tapered lasers[J]. *Optik*, 2018, 158: 502-507.
- [16] Du W C, Kang J J, Li Y, et al. Optimization of facet reflectivity of 450-nm GaN-based semiconductor lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39 (6): 0614002.  
杜维川, 康俊杰, 李弋, 等. 450 nm GaN 基半导体激光器腔面反射率的优化 [J]. *光学学报*, 2019, 39 (6): 0614002.
- [17] Song J, Gao X, Yan H Y, et al. Thermal lens effect of high power semiconductor laser waveguide and its influence on beam divergence angle of slow axis[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(10): 1005004.
- 宋健, 高欣, 闫宏宇, 等. 大功率半导体激光器波导热透镜效应及对慢轴光束发散角的影响 [J]. *中国激光*, 2018, 45(10): 1005004.
- [18] Skovgaard P M W, McInerney J G, Moloney J V, et al. Enhanced stability of MFA-MOPA semiconductor lasers using a nonlinear, trumpet-shaped flare [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, 9(9): 1220-1222.
- [19] Kristjánsson S, Eriksson N, Modh P, et al. Grating-based surface-emitting tapered unstable resonator laser simulations and experiments [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2001, 37(11): 1441-1448.
- [20] Lang R J, Hardy A, Parke R, et al. Numerical analysis of flared semiconductor laser amplifiers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1993, 29(6): 2044-2051.