

氧化锌随机激光器脊状波导外延层的设计研究

李志全¹ 刘 玮^{1*} 牛力勇¹ 李文超² 孙宇超¹

(¹ 燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004
² 东北大学秦皇岛分校自动化系, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 研究了 ZnO 薄膜脊状波导结构的光学特性, 并通过在 ZnO 薄膜上覆盖 MgO 外延层方式, 降低随机激光器的散射损耗。采用有限时域差分法(FDTD)数值模拟得出了仿真结果, 验证了 ZnO 脊状波导随机激光器可以实现高度方向化出射, 带有 MgO 外延层的 ZnO 脊状波导随机激光器可以避免激光的非轴向出射和降低散射损耗等特性。

关键词 激光器; 随机激光; ZnO 薄膜; 脊状波导; 有限时域差分法

中图分类号 TN248; O436; O484.4⁺1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1102014

Design and Study of ZnO Ridge-Waveguide Random Laser Extension Layer

Li Zhiquan¹ Liu Wei¹ Niu Liyong¹ Li Wenchao² Sun Yuchao¹

(¹ *Electrical Engineering College, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China*
² *Department of Automation, Northeastern University at Qinhuangdao, Hebei 066004, China*)

Abstract The optical properties of ZnO thin-film ridge-waveguide are studied, and the reduction of scattering loss inside the random cavities can also be obtained by covered ZnO films with MgO capped layer. Additionally, the finite difference time domain(FDTD) method for numerical calculation is utilized. The simulation results show that random laser with low scattering loss and directional optical output from the facets can be reached by employing annealed ZnO thin-film ridge-waveguide with a MgO capped layer.

Key words lasers; random laser; ZnO thin-film; ridge-waveguide; finite difference time domain

OCIS codes 140.3380; 140.3430; 140.3610; 310.6860

1 引 言

光波在具有增益的散射介质中传播和无序激射现象一直受到人们广泛的关注。1968 年, 俄罗斯科学院的 Letokhov^[1] 首先从理论上证明了随机介质中的激光现象。他认为光子在介质中的传播相当于经典粒子无轨行走, 光子的运动规律遵守有增益的散射方程。1999 年, 美国西北大学的 Cao 等^[2] 在 ZnO 半导体随机介质中观察到了受激辐射现象。人们把这种利用随机介质受激辐射构成的激光器称为随机激光器。

目前的随机激光理论已经证明, 随机激光是由

随机介质中的准态模放大形成的^[3]。光在强随机介质中的折射率随机变化导致光波局域化, 形成准态模, 相当于在介质中形成了若干个可以称为准态腔的等效光腔结构^[4,5]。这些等效光腔结构可以类似于传统光腔, 同样能支撑光波模式, 当随机介质获得增益并超过阈值后, 这些准态模就能被激发为激光模式。而光学波导结构是一种能够有效地限制和控制光传播的方法。这一思想已经扩展到增强随机介质的激光特性方面^[6~8]。本文采用 ZnO 薄膜同时作为散射体和增益介质, 构造一种脊状波导结构, 研究了 ZnO 脊状波导随机激光器的光学特性, 并设计

收稿日期: 2011-07-11; **收到修改稿日期**: 2011-08-23

基金项目: 国家自然科学基金(60877047)和河北省自然科学基金(F20100002002)资助课题。

作者简介: 李志全(1954—), 男, 博士, 教授, 主要从事光纤非线性光电检测方面的研究。E-mail: lzq54@ysu.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: lqwz1985@yahoo.com.cn

研究了带有 MgO 外延层的 ZnO 脊状波导随机激光器。

2 ZnO 脊状波导随机激光器的设计

2.1 等效光腔的设计与理论分析

ZnO 材料具有较宽的禁带(3.37 eV)和较大的激子束缚能(60 meV)是一种理想的室温紫外发光材料,在纳米结构上呈现多样性和易控性,现已被广泛用于各种激光器结构中^[9]。设计中的脊状波导结构是在衬底上采用 ZnO 纳米薄膜材料,利用其典型的光学特性^[10,11]。如图 1(a)所示,脊状波导结构横截面内脊高为 $b+d$,外脊高为 d ,脊宽为 a ,包层、芯区(厚度 $b+d$)和衬底的折射率分别为 n_0, n_1, n_2 。如图 1(b)的坐标系中, z 轴为入射光的传播方向,传播方向上等效折射率分别为 N_1, N_2 。由二维光波导理论可知,若波导中有单模传输,则波导层折射率必须大于两边介质的折射率,并且波导层等效折射率唯一。从图 1 中可明显看出 $b+d > d$,当 b, d 确定后, N_1, N_2 也确定了。为了降低耦合损耗,结构参数设定为 $a=200\text{ nm}, b=200\text{ nm}, d=500\text{ nm}$ 。

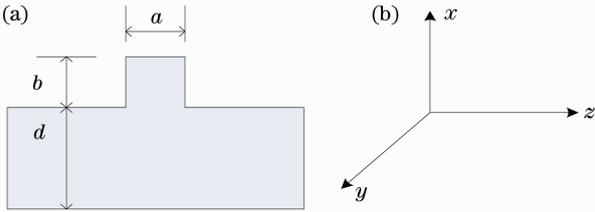


图 1 ZnO 脊状波导截面示意图。(a)截面示意图;
(b)横截面坐标系

Fig. 1 Schematic cross section of ZnO ridge waveguide.
(a) Schematic cross section of ridge waveguide;
(b) coordinate system of ridge waveguide section

根据麦克斯韦方程理论,电场中只考虑横向分量,即 $E_z = 0$,波导沿 y 方向上没有变化,即 $\partial/\partial y = 0$,则电场强度矢量 x, y, z 方向上满足的波动方程

$$\begin{cases} \nabla^2 E_x = \mu_0 \epsilon \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} \\ \nabla^2 E_y = \mu_0 \epsilon \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} \\ \nabla^2 E_z = \mu_0 \epsilon \frac{\partial^2 E_z}{\partial t^2} \end{cases} \quad (1)$$

在波导为电绝缘介质的条件下,可以进一步表达为

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} = \mu_0 \epsilon \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} \quad (2)$$

$E_y(x, z, t)$ 用分离变量法求解,得到有源层(折射率为 N_2)的电场通解为

$$E_y(x, z, t) = A_{2c} \cos(k_2 x) \exp[i(\omega t - \beta z)] + A_{2o} \sin(k_2 x) \exp[i(\omega t - \beta z)], \quad (3)$$

式中 $k_2^2 = N_2^2 k_0^2 - \beta^2$ 。利用介质不连续处电场切向分量连续的边界条件,得到 TE 模的本征方程为

$$\tan\left(k_2 \frac{d}{2}\right) = \frac{\gamma}{k_2} = \frac{(\beta^2 - N_1^2 k_0^2)^{1/2}}{(N_2^2 k_0^2 - \beta^2)^{1/2}}, \quad (4)$$

可用数值计算的方法得到传播常数,进而得到场分布。

光学增益可以看作是输入抽运功率的函数,设 L 是抽运条纹长度, I_{tot} 是 ZnO 缓冲层表面的全部光强,相应的光学增益 G 可推演得到

$$I_{\text{tot}}(L, \lambda) = \frac{I_{\text{sp}}(\lambda)}{G(\lambda)} \{ \exp[G(\lambda)L] - 1 \}, \quad (5)$$

式中 I_{sp} 为自发辐射, λ 为光增益的波长。利用数值计算,可以得到光增益和抽运强度的关系。

2.2 结构设计与分析

如上所述,采用脊状波导结构,可以增强 ZnO 薄膜内光线的横向限制,从而显著提高 ZnO 薄膜的光学增益。图 2 给出了 ZnO 脊状波导随机激光器的示意图,由颗粒物质组成的随机介质,微粒的空间分布是不均匀的,在某些区域分布着较多的散射微粒,对光波产生了相对更强的多重散射,延长了光子在其中的滞留时间,导致光波局域态的产生,起到了光腔的作用,从而使得随机介质在抽运激励下能够产生激光振荡。

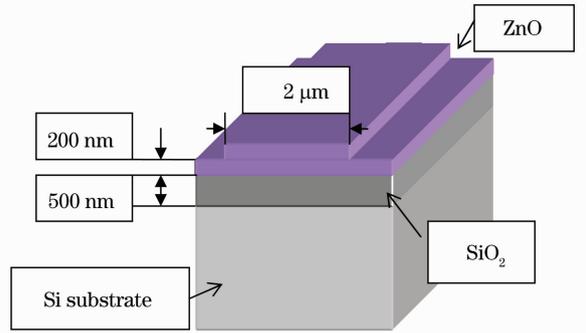


图 2 ZnO 脊状波导随机激光器示意图

Fig. 2 Schematic of ZnO ridge-waveguide random laser

设计中,采用后退火方法控制 ZnO 外延层大的平均颗粒尺寸^[12,13],得到随机激光器所需要的基本增益介质。据最新报道,低温沉积和耐高温处理可以在蓝宝石上形成(200)导向的 MgO。这是因为 ZnO 的多晶结构和蓝宝石的很相似,因此,在 ZnO 表面生长一层(200)导向的 MgO 也是有可能的^[14,15]。所以,相应 ZnO 和 MgO 表面的低附着能力可以允许 ZnO 和 MgO 颗粒和空穴的后退火生长。图 3 为带有 MgO 外延层的 ZnO 脊状波导随机

激光器的优化结构。MgO 外延层通过全内反射追踪由 ZnO 空穴散射到表面和脊状结构侧边的光。

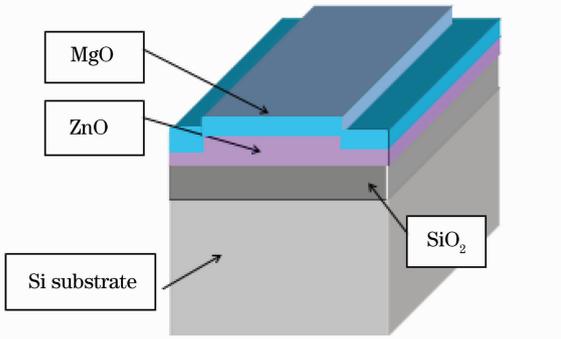


图 3 带有 MgO 缓冲层的退火 ZnO 脊状波导随机激光器示意图

Fig. 3 Schematic of annealed ZnO ridge-waveguide random laser with MgO extension layer

实验系统设计如图 4 所示，室温下，由三倍频 Nd:YAG 激光器在 6 ns, 10 Hz 的脉冲下抽运样品，波长为 355 nm，光束半径约 20 μm ，沿着某一确定方向入射到实验样品上。辐射激光经过柱面镜用 CCD 接收物象，同时经过一准直物镜，用分光计检测。图 5 给出了抽运强度在 1.2 MW/cm^2 时，带有和不带有 MgO 外延层的 TE 模远场发射图。光从不带有 MgO 缓冲层的样本表面出射，显示了多环斑点。相反，带有 MgO 外延层的样本显示了单一的光斑发射。因此，说明带有 MgO 外延层的退火 ZnO 脊状波导随机激光器可以降低散射损耗，实现紫外激光的方向性输出。

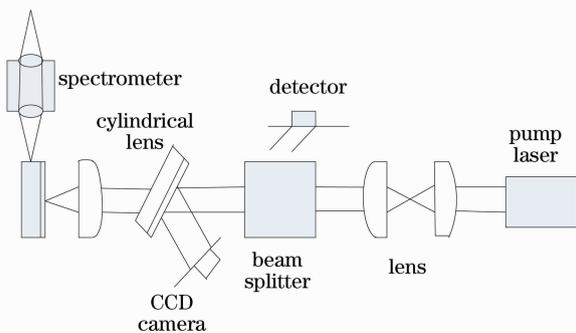


图 4 ZnO 脊状波导随机激光器的结构设计图
Fig. 4 ZnO ridge-waveguide random laser structure design

3 有限时域差分法仿真

有限时域差分法 (FDTD) 是计算介质中电磁场的一种数值方法，随时间的推进，可交替计算出光场

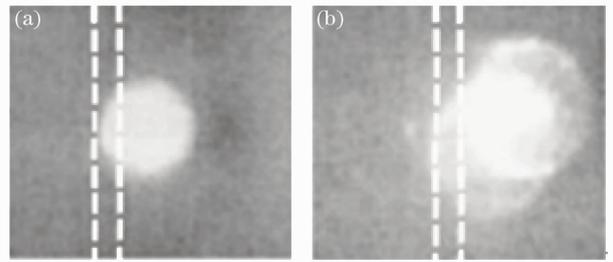


图 5 TE 模远场发射图。(a) 带有 MgO 外延层；
(b) 不带有 MgO 外延层

Fig. 5 TE mode far fields emission. (a) The samples with MgO capped layer; (b) the samples with MgO capped layer

中的电场矢量和磁场矢量，从而直接得到介质中光场的空间分布^[16]。

基于 FDTD 仿真原理，模拟和研究光在不同光学结构中的传播。具体模拟脊状波导随机激光器等效光腔的模式，其腔体结构的背景为空气，自由空间波长为 355 nm，腔长为 2 μm ，在此微腔区域的周围采用单元格为 $\Delta_{\text{perfect}} = 0.05 \mu\text{m}$ ，格点数为 5000 的完全匹配层的脊型网格作为吸收边界来终止计算区域。其选取的最佳匹配层 (PML) 中的 x 为格点离 PML 层边界的距离， z 为 PML 层的厚度。芯区和吸收层间距 $\Delta_{\text{interval}} = 1.2 \mu\text{m}$ 。采用空间步长为 $\Delta x = \Delta z = 0.02 \mu\text{m}$ ，时间步长为 $\Delta t = 0.0707 \text{ CT}$ 。

用 Matlab 编写程序仿真得到等效光腔的场分布，仿真结果如图 6 所示。要进一步分析脊状波导结构的优越性，采用与平面波导的情况作对比，分析光学损耗的问题。通过场分布的情况，可以得到一些数据，数值计算得到在相同的激发功率下，脊状波导的 TE 模的光增益近似是平面时的 2 倍。信号和抽运强度的耦合在脊状波导结构中增强了很多。图 7 给出了脊状和平面波导的 TE 模的光学增益与抽运强度关系的对比图。

带有 MgO 缓冲层的样本抽运阈值 (输出功率) 的结果证实该样本降低了随机激光器的散射损耗。抽运强度为 1.2 MW/cm^2 时，带有 MgO 缓冲层和不带有 MgO 缓冲层样本的 TE 模的激光特性如图 8 所示，可以看出二者分别在 0.61 MW/cm^2 和 0.69 MW/cm^2 处出现了折点 (阈值处)，在抽运强度高于这个折点时，从图 8 中，可以观察到线宽小于 0.4 nm 的尖峰值 (激光模式)，当抽运强度进一步增加时，更多的尖峰在光谱中出现。尖峰的数量随着激发面积的增加而增加。由此，验证了由带有 (200)

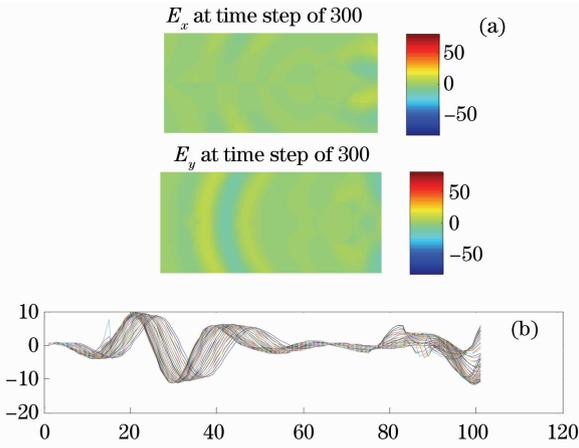


图 6 等效光腔的电场分布。(a)电场在 300 时间步时的瞬时场图;(b)在 0 到 100 范围内 E_y 场强度的二维曲线分布图

Fig. 6 Electric field distribution of the light equivalent cavity. (a) Instantaneous electric field when the time step is 300; (b) two dimensional curve distribution chart of E_y intensity whose range is 0~100

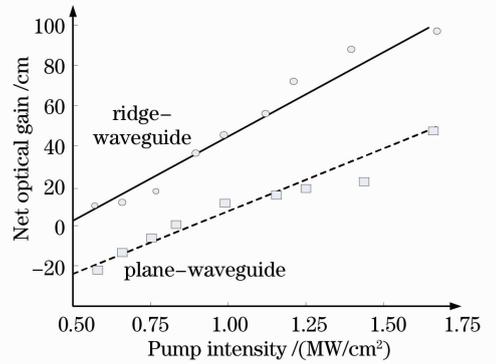


图 7 脊状和平面波导 TE 模的净光学增益和抽运强度关系的对比图

Fig.7 Contrast of ridge-waveguide and the planar waveguide's net optical gain and pump intensity relationship

导向的 MgO 缓冲层的 ZnO 外延层产生了相干随机激光,相干背散射实验表明,带有(200)导向的 MgO 缓冲层的 ZnO 外延层的散射平均自由程和发射波长近似相等时,才会产生相干随机激光。

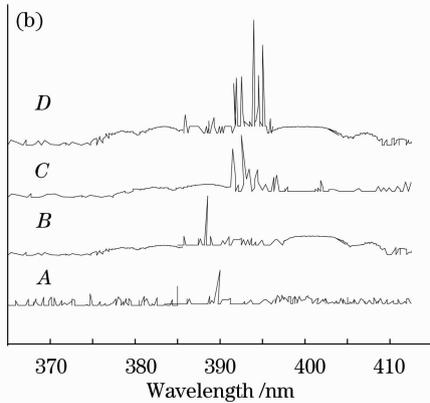
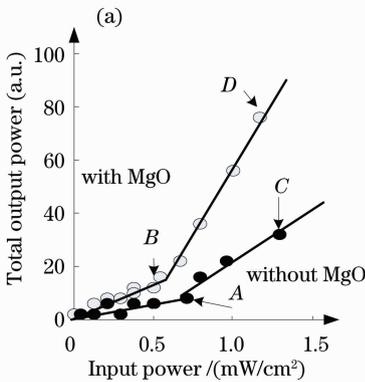


图 8 样本 TE 模的激光特性。(a)两种样本的输入功率和输出功率的对比图;
(b)为对应(a)中 A,B,C,D 4 点处的激光发射谱

Fig. 8 Laser characteristics of TE mode. (a) Contrast figure of two sample's input power and output power relationship; (b) emission spectra of the four corresponding dots in Fig. (a)

4 结 论

ZnO 脊状波导随机激光器等效光腔的光学特性表明:通过在 ZnO 薄膜上覆盖 MgO 外延层的方法,实现降低随机激光器的散射损耗;采用有限差分法数值模拟得出的仿真结果验证了 ZnO 脊状波导随机激光器可以实现高度方向化出射的特性;带有 MgO 外延层的 ZnO 脊状波导随机激光器可以避免激光的非轴向出射并可大幅度降低散射损耗。

参 考 文 献

1 V. S. Letokhov. Generation of light in a scattering medium with

negative resonance absorption [J]. *Sov. Phys. JETP*, 1968, **26**: 835~839
 2 H. Cao, Y. G. Zhao, S. T. Ho *et al.*. Random laser action in semiconductor powder [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **82**(11): 2278~2281
 3 P. Sebbah, C. Vanneste. Random laser in the localized regime [J]. *Phys. Rev. B*, 2002, **66**(14): 144202
 4 S. F. Yu, C. Yuen, S. P. Lau *et al.*. Zinc oxide thin-film random lasers on silicon substrate[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(17): 3244~3246
 5 Ye Yunxia, Fan Dianyuan. Incoherent radiation of amplifying random media[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 364~369
 叶云霞, 范滇元. 增益随机散射介质中的非相干辐射[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 364~369
 6 Wang Jiaxian, Ling Chaodong, Han Lei. Nanocrystalline silicon

- film passively Q-switched laser diode pumped Nd:YAG/LBO blue laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1564~1568
- 王加贤, 凌朝东, 韩磊. 纳米硅薄膜被动调Q的激光二极管抽运Nd:YAG/LBO蓝光激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1564~1568
- 7 Lin Zhixian, Guo Tailiang, Zhang Yong'ai *et al.*. Study of the ZnO nanomaterial field-emission cathode array based on graphical growth[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1739~1744
- 林志贤, 郭太良, 张永爱等. 基于图形化生长纳米氧化锌场致发射阴极阵列的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1739~1744
- 8 Wang Kejia, Zhang Qingquan, Lü Jiantao *et al.*. Dependence of spectral width of TM-polarization lasing modes on pumping intensity in two-dimensional random media[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(5): 2941~2945
- 王可嘉, 张清泉, 吕健滔等. 二维无序介质中横磁模的谱线宽度随抽运强度的变化特性[J]. *物理学报*, 2008, **57**(5): 2941~2945
- 9 Wang Hong, Theory Research and Numerical Simulation of Random Laser Radiation Characteristics [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005. 116~117
- 王宏. 随机激光辐射特性的理论研究与数值模拟[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005. 116~117
- 10 Linhua Xu, Xiangyin Li, Yulin Chen *et al.*. Structural and optical properties of ZnO thin films prepared by sol-gel method with different thickness[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2011, **257**(9): 4031~4037
- 11 Wang Huiqin, Liu Zhengdong, Leng Xinli. Dynamical propagation process of light in 2-D random mediums[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 709~712
- 王慧琴, 刘正东, 冷新丽. 光在二维无序介质中的动态传播过程[J]. *光子学报*, 2009, **38**(3): 709~712
- 12 Du Xiaosong, Zeng Xiong, Yang Bangchao *et al.*. The effect of annealing on the crystallinity of ZnO films[J]. *J. Functional Materials*, 2008, **39**(6): 798~798
- 杜晓松, 曾雄, 杨邦朝等. 退火对氧化锌薄膜结晶性能的影响[J]. *功能材料*, 2008, **39**(6): 798~798
- 13 Zhang Yu, Wang Gang, Cui Yiping *et al.*. Electrochemical deposition and stimulated emission of zinc oxide thin films[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1): 97~100
- 张宇, 王刚, 崔一平等. 氧化锌薄膜的电化学沉积法制备及受激发射研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(1): 97~100
- 14 Canyon Zhang. High-quality oriented ZnO films grown by sol-gel process assisted with ZnO seed layer [J]. *J. Phys. Chem. Solids*, 2010, **71**(3): 364~369
- 15 H. Y. Yang, S. F. Yu, H. K. Liang *et al.*. High-temperature lasing characteristics of randomly assembled ZnO nanowires with a ridge-waveguide[J]. *J. Appl. Phys.*, 2009, **106**(4): 043102
- 16 Xu Jjianfeng, Bo Zhongyang, Bai Jian *et al.*. Synthetic subdomain method for large-scale integrated optical waveguides FDTD simulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 5~9
- 徐建峰, 薄中阳, 白剑等. 大规模集成光波导时域有限元差分法仿真的子域合成法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 5~9

栏目编辑: 宋梅梅