

氧化锌单晶 DFB 半导体激光器的设计与分析

杨海艳, 胡芳仁, 郑煌晏, 朱敏杰, 陈凯文
(南京邮电大学光电工程学院, 江苏 南京 210023)

摘要:基于严格耦合波理论(RCWA)和介质平板波导理论,针对光通信中的1550 nm波长,设计了一种基于氧化锌(ZnO)单晶的分布反馈式(DFB)半导体激光器的光栅结构,分析了二维电场模式图以及激射波长线宽图,得到了光栅结构的变化对其单纵模传输的影响。仿真结果表明,当光栅的周期为489 nm,占空比为50%,光栅深度为400 nm时,全局电场能量达到了 8.3×10^7 J,光谱线宽小于 0.1 \AA 。该激光器具有很好的窄线宽输出以及波长选择特性。理论分析与仿真结果基本一致为后期进行该器件的制备提供了较好的参考。

关键词:严格耦合波理论;DFB 半导体激光器;氧化锌单晶;1550 nm 波长

中图分类号:TN248.4 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2015.09.007

Design and analysis of ZnO signal-crystal DFB laser diode

YANG Hai-yan, HU Fang-ren, ZHENG Huang-yan, ZHU Min-jie, CHEN Kai-wen

(Photoelectronic Engineering School, Nanjing University of Posts and Communications, Nanjing 210023, China)

Abstract: According to the rigorous coupled-wave theory (RCWA) and dielectric slab waveguide theory, the grating microstructure of a single crystal ZnO-based DFB laser diode in the 1550 nm wavelength communication band was proposed. A two-dimensional electric field mode and wavelength linewidth were analyzed. The influence of the grating structure variation on the property of the single longitudinal mode transmission was obtained. Numerical simulation shows that the whole electric field energy reaches about 8.3×10^7 J when the spectral linewidth is smaller than 0.1 \AA , the grating period is 489 nm, duty cycle is 50% and grating depth is 400 nm. This laser has a good wavelength selection property and narrow linewidth. The theoretical analysis conforms the numerical simulation well and it provides a good reference for the design and preparation of the device.

Key words: Rigorous Coupled-wave Theory; DFB Laser; Zinc Oxide signal-crystal; 1550 nm wavelength

1 引言

半导体激光器是通信、泵浦激光器、光信息存储器等不可缺少的重要光源,也是需要高效单色光源的光电子系统中的核心光学器件^[1],在军事、航空、通信等领域被广泛应用^[2-4]。然而半导体受温度变化影响较大、光谱线宽较宽对器件的进一步发展应用有一定的限制。因此,实现半导体激光器窄线宽输出且光谱稳定就成为当前研究的一个热点^[5]。

在单模传输半导体激光器的研究方面,人们已

经提出了不同的方法,可以大致分为两种:第一种是半导体激光器的外部解决方案,即把布拉格(Bragg)光栅及体全息光栅(VHG)分开,此方法对环境要求很高,还需要配备昂贵的散热装置,制造成本高及难度大限制了其应用发展;第二种是半导体激光器的内部解决方案,DFB 半导体激光器就是采用这种方法,该器件把用作选择性光谱反馈的光栅集成到整个谐振腔中,利用折射率周期变化结构来实现谐振腔反馈,同时利用 Bragg 光栅进行波长选择^[6-7],使

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61274121);江苏省自然科学基金资助项目(No. BK2012829);南京邮电大学人才引进科研启动基金资助项目(No. NY212007)资助。

作者简介:杨海艳(1987-),女,硕士生,主要研究方向为光通信器件。E-mail:hy_yang@126.com

收稿日期:2015-01-09

得DFB半导体激光器在单色性和稳定性方面有明显的优势,同时该器件工作温差范围较大,因此器件的应用范围很广泛。

ZnO单晶半导体材料由于具有较宽的禁带宽度(3.37 eV)和较大激子束缚能(60 meV)等优点可以作为一种优良的半导体单晶材料^[8-9],并且ZnO单晶在结构设计及制备方法上呈现其易控性和多样性。ZnO薄膜作为光栅用来制备DFB激光器已被成功报导^[10-11],然而到目前为止,关于ZnO单晶材料作为光栅用来制备DFB半导体激光器还没见报导。

分析光波在分布反馈半导体激光器中的传播,其核心就是分析光波在周期介质中传播。本文利用耦合波理论以及介质平板波导理论进行数值计算,并针对光通信波段1550 nm波长设计了基于ZnO单晶的DFB半导体激光器的波导光栅。分析了光栅周期、占空比(光栅宽度与光栅周期的比)、光栅深度等参数对单模传输的影响从而得出最佳光栅设计参数。

2 理论模型

严格矢量耦合波理论^[12]方法是根据光栅的电磁场理论建立麦克斯韦方程组求解得出,同时结合介质平板波导理论来计算刻蚀光栅结构。本文在仿真时都采用的入射波为TE波,故这里只是讨论TE模单模传输特性。

光是一种电磁波,它的传播遵循电磁波的波动方程:

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0 \quad (1)$$

其中, k 为波数; E 为电场强度。

对DFB半导体激光器来说,我们可以看作是一个在激光器谐振腔内在腔长方向上折射率受周期性微扰的线性波导。所以根据赫姆霍兹方程,含有布拉格光栅的波动方程可以写为:

$$\frac{d^2}{dx^2} E_y(x, z) + \frac{d^2}{dz^2} E_y(x, z) + k_0^2 \cdot n^2(x, z) \cdot E_y(x, z) = 0 \quad (2)$$

其中, E 是 Z 的函数,与坐标 x, y 无关; k_0 为真空波数; $n(x, z) = n_0 + \Delta n(x, z)$; n_0 为光栅区的两种材料折射率平均值; $\Delta n(x, z)$ 为折射率沿 Z 方向周期性函数,且 $\Delta n(x, z) = \sum_{(m \neq 0)} (\Delta n_m(x) \cdot e^{i \cdot 2\beta_B \cdot z})$ 。其中, $\beta_B = m\pi/\Lambda$; m 为光栅阶数; Λ 为光栅周期; β_B 为布拉格波数。

波动方程(2)的通解可以表示为:

$$E_y(x, y) = u(x) \cdot (A(z) \cdot e^{-i\beta z} + B(z) \cdot e^{i\beta z}) \quad (3)$$

其中, $u(x)$ 为 x 方向光场; $\beta = k_0 n_{eff}$, n_{eff} 为有效折射率; $A(z)$ 为前向波即为入射波; $B(z)$ 为后向波。根据耦合波理论,由于光栅折射率周期性变化,导致有源区的光有无穷对不同阶的光,只有Bragg频率附近的一对正向波 $A(z)$ 和反向波 $B(z)$ 可以提供很强的光学反馈,即只有满足布拉格反射条件的波长才能在介质中形成振荡实现单纵模的传输。

将式(3)代入式(2)中,经过计算,得到耦合波方程组:

$$\begin{cases} \frac{dA}{dz} + (\alpha - i\delta)A = i\kappa B \\ -\frac{dB}{dz} + (\alpha - i\delta)B = i\kappa A \end{cases} \quad (4)$$

其中, $A(z)$ 写为 A ; $B(z)$ 写为 B ; δ 为相位失谐因子,

$$\delta = \frac{\beta^2 - \beta_0^2}{2\beta_0} \approx \beta - \beta_0。$$

在周期性微扰的波导中,前向波 A 和后向波 B 相互耦合,耦合系数是 k ,定义为:

$$k = \frac{k_0^2 n_0}{\beta} \cdot \frac{\int_0^{d_g} \Delta n(x) \cdot u(x)^2 dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} u(x)^2 dx} \quad (5)$$

耦合系数 k 的大小表示分布反馈的强弱,与光栅的结构相关,包括光栅周期,深度,光栅格子数目,以及占空比。下面本文将结合介质平板波导理论以及耦合波理论讨论单模传输条件,进而计算出我们所需的DFB半导体激光器光栅的相关参数。

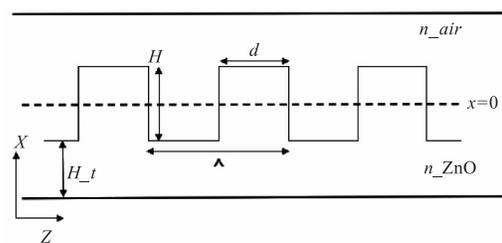


图1 周期光栅波导结构图

Fig. 1 Structure of Periodic grating waveguide

如图1是周期光栅波导结构图^[13],入射光在 $Z=0$ 处入射,光沿 Z 方向传输。根据介质平板波导理论,可以使其等效为介质平板波导结构。

DFB激光器的布拉格条件为:

$$m\lambda_{\text{Bragg}} = 2n_{eff}\Lambda \quad (6)$$

式中, m 为布拉格阶数(通常取1),介质等效折射率 $n_{eff} = \sqrt{(1-F) \cdot n_{air}^2 + F \cdot n_{ZnO}^2}$, $F = d/\Lambda$ 为占空比。

由式(6)可知,合适的光栅周期、占空比等光栅结构能够使激光器选频,形成受激辐射,实现激光的单纵模输出。

3 计算结果

根据前面理论分析,设计了 DFB 半导体激光器内布拉格光栅的结构参数如表 1 所示。

表 1 DFB 半导体激光器光栅结构参数

参数	数值	备注
d/nm	244.7	光栅厚度
H/nm	400	光栅高度
H_g/nm	30	增益层厚度
λ/nm	1550	近似激光波长
n_{ZnO}	2.0041	ZnO 折射率
n_{air}	1	空气折射率
Λ/nm	489.3	光栅周期
N	50	光栅格子数目

本文采用软件 Comsol Multiphysics 4.2a 建立模型,在温度为 273 K 条件下,从光栅左侧端口输入功率是 1 W 横向 TE 波为入射波,对表 1 所用参数进行仿真验证。

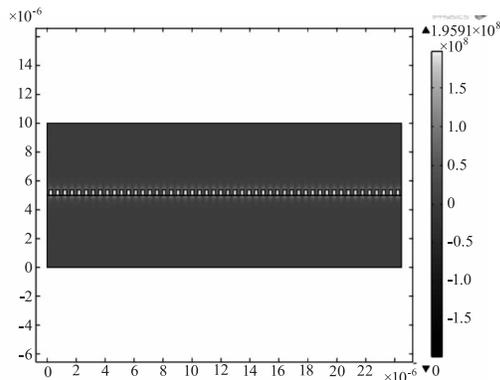


图 2 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 时 TE 入射晶体波导光栅 DFB 半导体激光器结构中的光场分布图 $H = 400 \text{ nm}$, $\Lambda = 489.3 \text{ nm}$

Fig. 2 Distriution of light field in DFB diode laser($\lambda = 1550 \text{ nm}$)

如图 2,其中 xy 是光栅的尺寸图,左侧的灰度分布图表示电场强度,我们在进行仿真过程中采用的波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 的光注入到增益层中,由图可以看出,大部分的光场很好的集中在增益层区域,说明光栅可以对晶体内部的光场有调制作用,实现光的正反馈。

图 3 是对波长从 1549.9 ~ 1550.1 nm 的范围进行参数化扫描,扫描的步长为 0.01 nm 得到 DFB 半导体激光器光谱线宽示意图以及电场模式线图,纵坐标表示 Z 方向的场强分布,图中 1550 nm 的振幅最强、谐振效果最好,且全局电场能量在 1550 nm 波长时达到了约 $8.3 \times 10^7 \text{ J}$,同时由右上角图可以看

出该谐振线宽(谐振峰半峰宽)仅为 0.1 \AA 。说明了光栅对其他波长的光起到了很好的抑制作用,满足了单模激光输出条件。

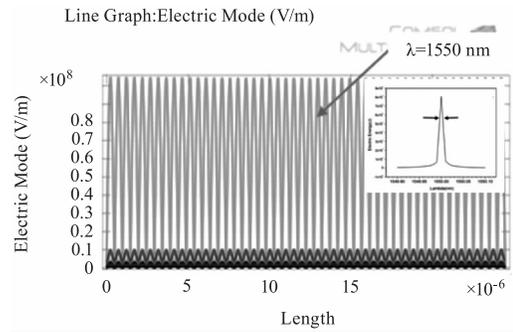


图 3 1550 nm 附近电场模式线图

Fig. 3 Electric field mode near 1550 nm

光栅高度 H ,光栅周期 Λ 等参数对激光器的单纵模传输具有很大的影响,作者使用仿真软件对设计的参数进行仿真验证,结果如图 4 ~ 6 所示。

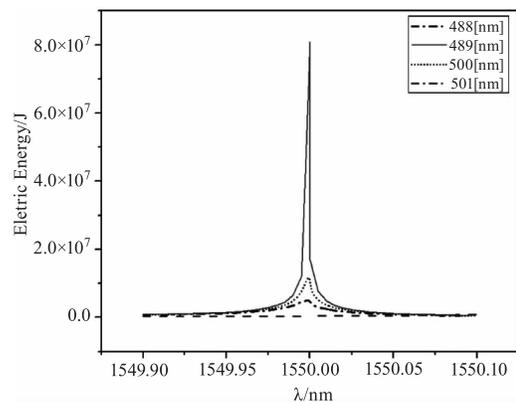


图 4 DFB 半导体激光器的波导光栅的全局电场能量随光栅周期的变化, $H = 400 \text{ nm}$, $F = 0.5$

Fig. 4 Total electric energy change with grating period in DFB diode laser($H = 400 \text{ nm}$, $F = 0.5$)

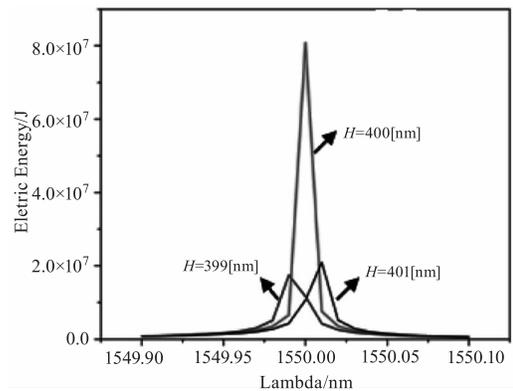


图 5 DFB 半导体激光器的波导光栅的全局电场能量随光栅深度的变化, $\Lambda = 489 \text{ nm}$, $F = 0.5$

Fig. 5 Total electric energy change with the grating depth in DFB diode laser($\Lambda = 489 \text{ nm}$, $F = 0.5$)

图 4 表示 DFB 半导体激光器的波导光栅的全局电场能量随光栅周期的变化的曲线图, 在 1550 nm 波长附近, 光栅周期为 400 nm 时电场能最大, 并且 TE 波的电场能量随光栅周期的变化影响比较敏感。图 5 表示 DFB 半导体激光器的波导光栅的全局电场能量随光栅深度的变化曲线图, 且随着光栅深度的增大, 能量的峰值对应的波长有红移现象。图 6 表示全局电场能量随占空比的变化曲线, 由图可得 1550 nm 附近波长均被很好的抑制, 然而只有在占空比为 0.5 时, 全局电场能最大且该谐振峰半峰宽最小。

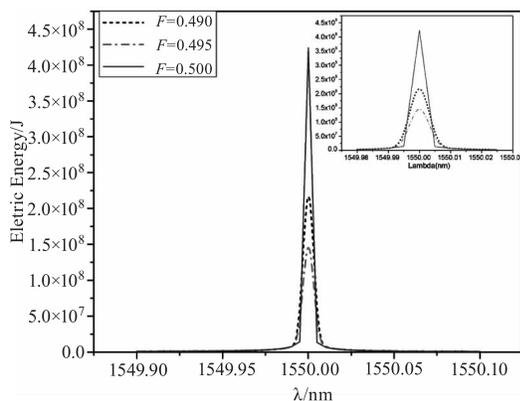


图 6 DFB 半导体激光器的波导光栅的全局电场能量随占空比的变化, $\Lambda = 489 \text{ nm}$, $H = 400 \text{ nm}$
Fig. 6 Total electric energy change with duration in DFB diode laser ($\Lambda = 489 \text{ nm}$, $H = 400 \text{ nm}$)

通过以上分析, 本文设计的基于 ZnO 单晶的 DFB 半导体激光器的光栅结构参数与仿真结果基本上吻合, 从而验证了 1550 nm 波段的最佳光栅结构参数如下: 光栅高度为 400 nm, 光栅周期为 489 nm, 光栅占空比为 50%, 在以上参数下可具有更好的单纵模传输特性。

4 结论

本工作是基于严格耦合波理论结合介质平板波导理论设计了一种新型的基于 ZnO 单晶的 DFB 半导体激光器的光栅结构, 这种激光器在光通信波段 1550 nm 波长处有很好的单纵模传输特性。

参考文献:

- [1] H C Lee, R E Gaensslen. Advances in fingerprint technology [M]. Elsevier, 1991.
- [2] Taniyasu Y, Kasu M, Makimoto T. An aluminium nitride light-emitting diode with a wavelength of 210 nanometres [J]. Nature, 2006, 441: 325 - 328.
- [3] Hirayama H, Tsukada Y, Maeda T, et al. Marked enhancement in the efficiency of deep-ultraviolet AlGaN light-emitting diodes by using a multi quantum-barrier electron locking layer [J]. Appl Phys Express, 2010, 3: 031002.
- [4] Khan M A, Shatalov M, Maruska H P, et al. III-Nitride UV devices [J]. Jpn J Appl Phys, 2005, 44 (10): 7191 - 7206.
- [5] B L Volodin, S V Dolgy, E D Melink, et al. Wavelength stabilization and spectrum narrowing of high-power multimode laser diodes and arrays by use of volume Bragg gratings [J]. Opt Lett, 2004, 29 (16): 1891 - 1893.
- [6] Volodin B L, Dolgy S V, Melnik E D, et al. Wave-length stabilization and spectrum narrowing of high-power multimode laser diodes and arrays by use of volume Bragg gratings [J]. Opt Lett, 2004, 29 (16): 1891 - 1893.
- [7] Glebov L B. Optimizing and stabilizing diode laser spectral parameters [J]. Photonics Spectra, 2005 (1): 90 - 94.
- [8] P C Chang, Z Fan, C J Chien, et al. High-performance ZnO nanowire field effect transistors [J]. Appl. Phys. Lett., Sep., 2006, 89: 133113 - 1 - 133113 - 3.
- [9] Pearton S J, Norton D P, Ip K, et al. Recent progress in processing and properties of ZnO [J]. Superlattices and Microstructures, 2003, 34: 3 - 32.
- [10] D Hofstetter, Y C Bonetti, A H El-Shaer, et al. Demonstration of an ultraviolet ZnO-based optically pumped 3rd order distributed feedback laser, Appl [J]. Phys Lett., Sep. 2007 91 (11): 111108 - 1 - 111108 - 3.
- [11] D Hofstetter, R Theron, A -H El-Shaer, et al. Demonstration of a ZnO/Mg ZnO-based one-dimensional photonic crystal multi-quantum well laser, Appl [J]. Phys Lett., Sep. 2008 93 (10): 101109 - 1 - 101109 - 3.
- [12] Kogelnik H, Shank C V. Coupled-wave theory of distributed feedback lasers [J]. Journal of Applied Physics, 1972, 43 (5): 2327 - 2335.
- [13] WANG Yongqiang, ZHU Bo, et al. Simulation analysis of silicon-based GaN wavelength-tunable DFB laser [J]. Laser & Infrared, 2014, 44 (8): 874 - 878. (in Chinese)
王永强, 诸波, 等. 硅基氮化镓波长可调 DFB 激光器的模拟分析 [J]. 激光与红外, 2014, 44 (8): 874 - 878.