

# GaN 基蓝光激光器光场特性模拟\*

叶晓军 朱晓鹏 徐 云 孙永伟 侯识华 种 明 陈良惠

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

**摘要:** 采用有限差分法对 GaN 基多量子阱(MQWs)脊形激光器进行二维光场模拟。InGaN 和 AlGaN 材料的折射率分别由修正的 Brunner 以及 Bergmann 方法得到。分析了激光器单模特性和远场发散角同器件的脊形刻蚀深度和脊形条宽的关系。研究了在脊形上用 Si/SiO<sub>2</sub> 膜取代传统 SiO<sub>2</sub> 介质膜这种新的脊形设计对激光器结构参数的影响。模拟结果发现, 脊形条宽越窄, 脊形刻蚀深度越深, 平行结平面方向的发散角越大, 但由此会引起单模特性不稳定, 两者之间有一个折衷值。通过引入新的脊形设计, 可以降低对器件刻蚀深度精度的要求, 同时有很好的单模稳定性。

**关键词:** 二维光场模拟; GaN 激光器; 脊形宽度; 刻蚀深度; 发散角

**PACC:** 0260; 0350D; 7280E

中图分类号: TN 248.4

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)08-1004-05

中出现会引起数据读取错误。

## 1 引言

发光波段在 400~410nm 的 GaN 基蓝紫光激光器是高密度光存储系统中最有希望的光源。1996 年, 日本日亚公司的中村(Nakamura)宣布实现室温下连续激射的蓝紫光激光器<sup>[1]</sup>。此后, GaN 基激光器方面的研究取得一系列的重大突破。目前, 已经有包括日亚、索尼和 Cree 在内的多家公司获得了实用化的激光器。

但是蓝紫光激光器要在高密度光存储系统中被广泛采用还有一些障碍, 主要是低远场发散角纵横比和基横模工作的实现。远场发散角纵横比太大会降低激光束和棱镜之间的耦合效率, 因此通常 DVD 系统中激光器的纵横比要求低于 2.5。要实现这么低的纵横比, 必须在平行结平面方向的发散角  $\theta_{\parallel}$  要大, 同时在垂直结平面方向的发散角  $\theta_{\perp}$  要小。要实现大  $\theta_{\parallel}$ , 在激光器侧向上就必须有大的  $\Delta n$ (有效折射率差), 然而( $n$  太大容易产生高阶模式, 导致侧向基横模工作模式的不稳定, 从而在输出光功率和电流的关系曲线上出现扭折。这种扭折在光存储系统

已有多篇文献报道了 GaN 基蓝光激光器一维光场的模拟结果<sup>[2,3]</sup>。利用一维光场模拟, 结合材料生长, 可以优化各层材料厚度, 使光场在有源区有较大的限制因子, 从而降低激光器的阈值电流, 获得室温激射的激光器。一维光场模拟能得到  $\theta_{\perp}$ , 但不能获取  $\theta_{\parallel}$ , 因此对激光器的远场光斑设计没有太大帮助。目前实用化的激光器大多采用脊形结构, 本文利用二维有限差分法模拟了脊形激光器中脊形刻蚀深度和脊形条宽等结构参数对器件的单模特性和  $\theta_{\parallel}$  的影响。由于垂直方向发散角  $\theta_{\perp}$  的优化要考虑有源区附近的材料结构, 同器件的材料生长有很大关系, 因此我们不对垂直方向的发散角作模拟优化。模拟中 AlGaN 和 InGaN 等材料的折射率采用修正的 Brunner 以及 Bergmann 方法<sup>[4]</sup>得到。

## 2 二维有限差分法简介

对图 1(a) 所示的 GaN 激光器结构, 采用 Stern 的基本方法<sup>[5]</sup>, 利用不等间距有限差分网格计算半导体激光器的二维光波导模式。有限差分方法首先

\* 国家高技术研究发展计划资助项目(No. 2002AA31116Z)

叶晓军 男, 博士研究生, 主要从事 GaN 基蓝光激光器的研制。

2003-08-23 收到, 2003-12-17 定稿

©2004 中国电子学会

要将波导结构划分成长方形的有限差分网格。折射率  $n(x, y)$  在每个格子中都是常数，代表每个格子的节点坐标取格子的中心位置坐标，折射率只在格子的边界上发生变化。网格如图 1(b) 所示， $(x_r, y_s)$  为网格坐标， $r$  和  $s$  分别为网格的行和列序号。图 1(b) 所示为中心点为  $P$  的五个差分格子之间的关系，图中标出了格子的尺寸大小。可以看出这里没有采用均匀网格，即网格大小是随网格位置而变化的。这样做的目的是使其能更好地模拟一些具有比较复杂的小尺寸结构的器件，例如量子阱结构。在场变化比较大和特征尺寸比较小的区域，网格取密一些可以提高计算精度。

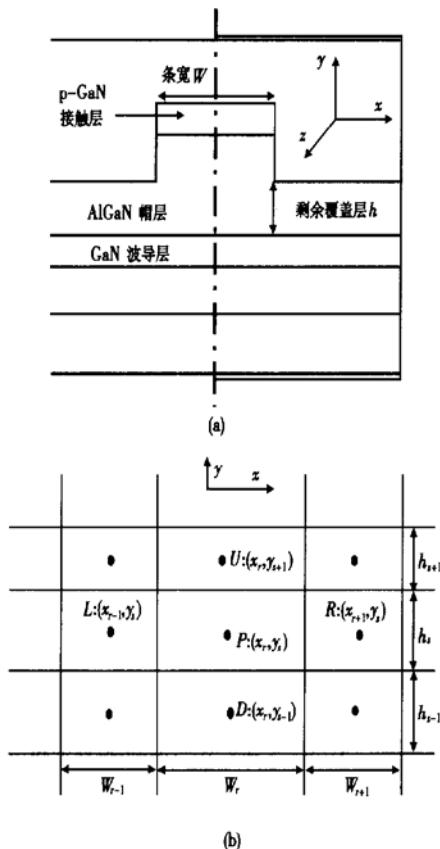


图 1 (a) 脊形 GaN 激光器的波导结构;(b) 不等间距的五点有限差分格式单元格示意

Fig. 1 (a) Waveguide structure of ridge-GaN laser diodes; (b) Cell structure of non-equal five finite difference grids

从 Maxwell 波动方程出发，利用半矢量近似，即电场和磁场的分量都只是  $x$  和  $y$  的函数，沿  $z$  方向上的变化只存在于相位传播因子中，则波动方程可以写成<sup>[6]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + (\bar{k}^2 - \bar{\beta}^2) E_x = 0 \\ \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial y^2} + (\bar{k}^2 - \bar{\beta}^2) E_y = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\bar{k}$  和  $\bar{\beta}$  各为电磁波在介质中的复波数和复传播常数。

根据 TE 或 TM 模式的情况，将每点的波动方程写成五点差分格式:

$$a_{r-1,s}E_{r-1,s} + a_{r+1,s}E_{r+1,s} + a_{r,s-1}E_{r,s-1} + a_{r,s+1}E_{r,s+1} + a_{r,s}E_{r,s} = \bar{\beta}^2 E_{r,s} \quad (2)$$

式中  $E_{r-1,s}, E_{r+1,s}, E_{r,s-1}, E_{r,s+1}, E_{r,s}$  是各个格点中的场强； $a_{r-1,s}, a_{r+1,s}, a_{r,s-1}, a_{r,s+1}, a_{r,s}$  是相应的差分系数。对边界点采用零边界条件或指数衰减边界条件处理。

将网格按一定顺序编号，使离散化的场构成一个列矢量  $\mathbf{E}$ ，所有场值前面的系数构成一个方阵  $\mathbf{R}$ ，就变成了一个代数特征方程:

$$\mathbf{RE} = \bar{\beta}^2 \mathbf{E} \quad (3)$$

利用带位移的反幂法求解特征方程，从而求出特征值  $\bar{\beta}$  以及各点的场强分布。

### 3 器件模拟

#### 3.1 激光器模型

模拟中采用日亚公司的激光器结构<sup>[7]</sup>，如图 2 所示。蓝宝石衬底上生长 2~3 μm 的 GaN，然后是 AlGaN 帽层，有源区由 InGaN 多量子阱组成，有源区两侧是 GaN 波导层。在有源区和 p-GaN 波导层之间还有一层 AlGaN 电流阻挡层。p-GaN 之上是 AlGaN/GaN 的超晶格帽层，然后是 p-GaN 电极接触层。脊形一般用反应离子刻蚀( RIE ) 或感应耦合等离子体( ICP ) 刻蚀形成。其中脊形深度是影响  $\Delta n$  的一个关键参数。脊形两侧盖上 SiO<sub>2</sub> 介质膜。脊形刻蚀深度用剩余覆盖层厚度  $h$  ( 如图 1(a) 所示 ) 来表示，剩余覆盖层越薄，则刻蚀深度越大。实际器件中，剩余覆盖层应该在 GaN 波导层以上，如果刻蚀到波导层，容易造成有源区损伤。

#### 3.2 单模工作状态

对于普通的脊形激光器，只要激光器的脊形条宽足够窄，就能工作在单模状态<sup>[6]</sup>。在二维有限差分

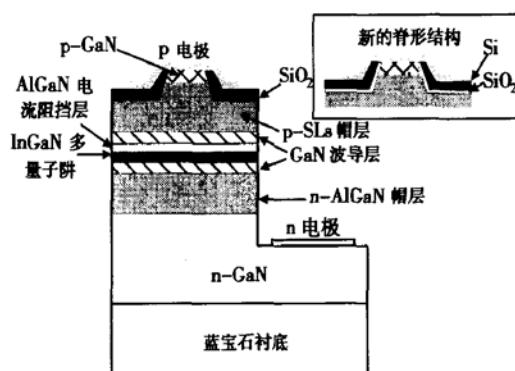


图 2 激光器结构示意图

Fig. 2 Typical GaN laser diodes structure

模拟中我们用一阶模式限制因子截止值来判断截止条宽,计算中把限制因子的截止值定为 0.023,模拟结果见图 3。如图 3 中的插图所示,在限制因子截止值附近,高阶模光场扩散很大,此时高阶模的增益很小,达不到激射条件,可以认为高阶模截止。从图中的曲线可以看出剩余覆盖层厚度越薄,即刻蚀深度越深,截止条宽越小;刻蚀深度越小,截止条宽越宽。实际器件中,脊形的深度不能太小,否则会增加电流侧向扩散效应<sup>[8]</sup>。因此,要获得好的单模稳定性,需要在一定刻蚀深度下,采用尽量窄的脊形。

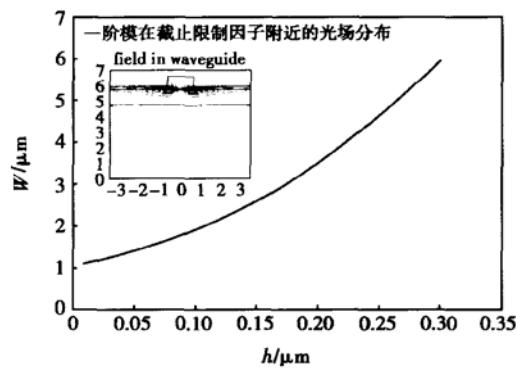


图 3 二维半矢量有限差分法计算的截止条宽

Fig. 3 Cut-off ridge width calculated by finite difference method

### 3.3 结平面方向的远场发散角 $\theta_{\parallel}$

利用二维有限差分可以模拟  $\theta_{\parallel}$  和刻蚀深度以及条宽的关系,模拟结果见图 4。在一定的脊形条宽下(取条宽 2 μm),刻蚀深度越大,结平面方向的发散角  $\theta_{\parallel}$  越大;而在一定的刻蚀深度下(取剩余覆盖层厚度为 40 nm),激光器条宽越窄,  $\theta_{\parallel}$  越大。因此如

果只考虑平行结平面方向的远场发散角,则激光器的条宽越窄,刻蚀深度越深,  $\theta_{\parallel}$  越大。

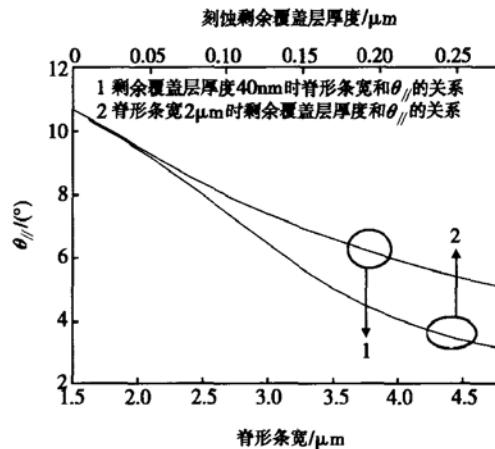


图 4 平行结平面方向的远场发散角同脊形条宽和刻蚀深度的关系

Fig. 4  $\theta_{\parallel}$  as a function of ridge width and etching depth

### 3.4 新的脊形结构

在实际器件中,激光器条宽受到工艺的限制往往不能做得很窄,因此必须重新考虑高阶模的抑制和大  $\theta_{\parallel}$  问题。要获得大的  $\theta_{\parallel}$ ,可以通过增加脊形刻蚀深度获得。然而,从前面的模拟可以看到,从单模特性方面考虑,最小覆盖层厚度不能太小。图 5 给出的是条宽为 2 μm 的激光器的光限制因子和  $\theta_{\parallel}$  同刻蚀深度的关系,剩余覆盖层厚度从 10 nm 到 300 nm。从图中可以看出增加刻蚀深度后,基模和高阶模之间的限制因子差降低,导致两者在激光器内部的模式增益差降低,容易产生高阶模式。为了保证基模工作,必须保证两个模式之间的增益差足够大即两者的限制因子有足够大的差别。同时为保证远场发散角的纵横比足够低,  $\theta_{\parallel}$  必须达到一定的数值,这里设为 8°。综合考虑  $\theta_{\parallel}$  和前面提到的单模特性,则刻蚀深度必须控制在 ±10 nm 的精度范围,见图 5 阴影部分,这个精度在刻蚀工艺中很难控制。

最近索尼公司提出用新的脊形结构 Si/SiO<sub>2</sub> 取代传统 SiO<sub>2</sub> 结构<sup>[9]</sup>(见图 2 的插图),并通过实验验证了新的脊形结构对单模特性的提高作用,我们从理论上对此进行说明。Si 在 400 nm 波段有很强的吸收作用。脊形激光器中,基模以上的高阶模式光场分布扩展得很厉害(见图 3 中的插图),相应的吸收系数也很大,因此在新的脊形设计中,适当选择 SiO<sub>2</sub> 的厚度就能使高阶激射模式不容易出现。图 6 是在

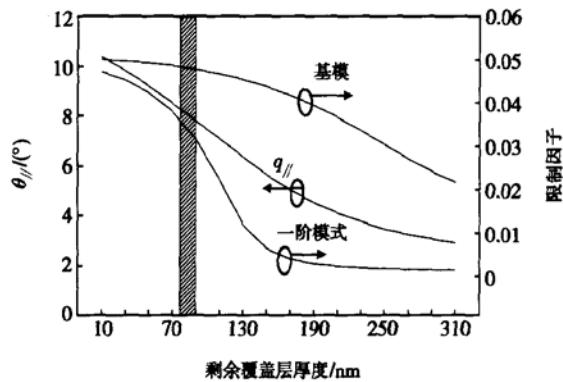


图 5 零阶模和一阶模的限制因子以及  $\theta_{//}$  同刻蚀深度的关系  
Fig. 5 0<sup>th</sup> order & 1<sup>st</sup> order mode confinement factors and  $\theta_{//}$  as a function of etching depth

Si 厚度一定的情况下(80nm)下, 基模和一阶模的吸收系数随  $\text{SiO}_2$  层厚度变化的曲线, 选择一定的  $\text{SiO}_2$  层厚度, 可以保证对基模有较小的作用, 而对高阶模有很强的吸收作用, 这样就抑制了高阶模的产生.

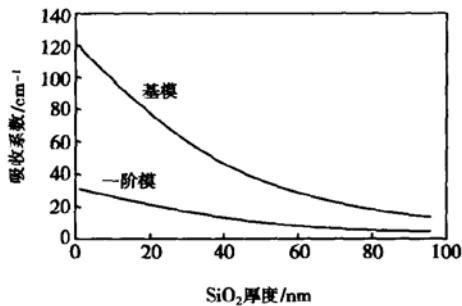


图 6 基模和一阶模的吸收系数随  $\text{SiO}_2$  厚度的变化  
Fig. 6 0<sup>th</sup> and 1<sup>st</sup> modes absorption coefficients as a function of  $\text{SiO}_2$  film thickness

采用新的脊形设计, 剩余覆盖层越薄, 两个模式之间吸收系数的差别越大, 见图 7. 而从图 5 可以看到, 在传统  $\text{SiO}_2$  脊形结构中, 两个模式之间的增益差在刻蚀深度增大时变小. 采用新的脊形设计增加了两个模式在深刻蚀深度时的增益差, 从而抑制高阶模式的产生, 获得稳定的单模工作模式. 新的脊形设计降低了对器件刻蚀深度精度的要求, 使刻蚀深度要求的精度范围达到  $\pm 30\text{nm}$  (见图 7 中的阴影部分), 在保证较大  $\theta_{//}$  的同时还能实现单模工作。

## 4 结论

本文利用二维有限差分法分析了器件结构参数

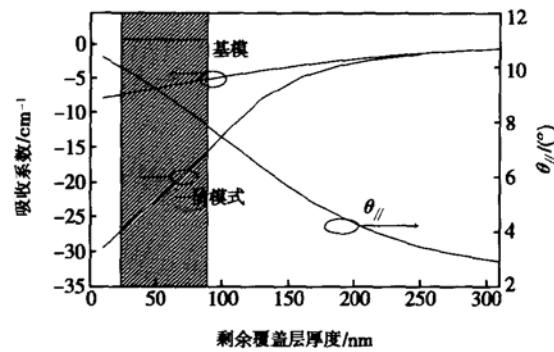


图 7 新脊形结构中基模和一阶模的吸收系数以及  $\theta_{//}$  随剩余覆盖层厚度的变化  
Fig. 7 0<sup>th</sup> order & 1<sup>st</sup> order mode confinement factors and  $\theta_{//}$  as a function of etch depth in new ridge structure

对单模特性及平行结平面方向的远场发散角  $\theta_{//}$  的影响. 模拟结果发现, 在刻蚀深度一定的情况下, 激光器条宽越窄, 则  $\theta_{//}$  越大, 单模特性越好; 在条宽一定的情况下, 脊形刻蚀深度越大,  $\theta_{//}$  越大, 但由此会引起单模特性的不稳定, 刻蚀深度的选择必须有一个折衷值. 通过引入新的脊形设计, 可以降低对器件刻蚀深度精度的要求, 同时有很好的单模稳定性.

## 参考文献

- [1] Nakamura S, Senoh M, Nagahama S, et al. Room-temperature continuous-wave operation of InGaN multi-quantum-well structure laser diodes. *Appl Phys Lett*, 1996, 69(26): 4056
- [2] Bergmann M J, Casey H C Jr. Optical-field calculations for lossy multiple-layer  $\text{Al}_{x}\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_{x}\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  laser diodes. *J Appl Phys*, 1998, 84(03): 1196
- [3] Onomura M, Saito S, Sasanuma K, et al. Analysis of transverse modes of nitride-based laser diodes. *IEEE J Sel Topics Quantum Electron*, 1999, 5(3): 765
- [4] Laws G M, Larkins E C, Harrison I. Improved refractive index formulas for the  $\text{Al}_{x}\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  and  $\text{In}_{x}\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  alloys. *J Appl Phys*, 2001, 89(02): 1108
- [5] Stern M S. Semivectorial polarised finite difference method for optical waveguides with arbitrary index profiles. *IEE Proc Pt J*, 1988, 135(1): 56
- [6] Guo Changzhi. Model theory of semiconductor lasers. Beijing: Posts & Telecom Press, 1989 (in Chinese) [郭长志. 半导体激光器模式理论. 北京: 人民邮电出版社, 1989]
- [7] Nagahama S, Yamamoto T, Sano M, et al. Blue-violet nitride lasers. *Phys Status Solidi A*, 2002, 194(2): 423
- [8] Jiang Jianping. Semiconductor lasers. Beijing: Electronica Industry Press, 2000 (in Chinese) [江剑平. 半导体激光器. 北京: 电子工业出版社, 2000]

京: 电子工业出版社, 2000]

lasers. *Phys Status Solidi A*, 2002, 192(2): 269

[9] Takeya M, Tojo T, Asano T, et al. High-power AlGaN

## Optical Simulation of GaN Blue Laser Diode<sup>\*</sup>

Ye Xiaojun, Zhu Xiaopeng, Xu Yun, Sun Yongwei, Hou Shihua, Chong Ming and Chen Lianghui

(Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** 2D finite-difference method is used to simulate the optical field of GaN MQWs blue laser diode. The refractive index of InGaN and AlGaN is determined by the corrected Brunner method and the Bergmann method, respectively. The relation between the single transverse mode and divergence angle with the laser diode's ridge width and the ridge-etched depth is analyzed. A new ridge design in which Si/SiO<sub>2</sub> replaces traditional SiO<sub>2</sub> film on ridge is simulated. The simulation results show that the deeper the ridge is etched, the bigger the  $\theta_{\parallel}$  (divergence angle running parallel with the junction) is. But deep depth of ridge etched causes the instability of the lasing mode because of the large  $\Delta n$ . There is a trade off for etched depth between the large  $\theta_{\parallel}$  and the stability of lasing mode. The new ridge design makes the control of etching process easy and has a good single mode at the same time.

**Key words:** optical simulation; GaN laser diode; ridge width; etching depth; divergence angle

PACC: 0260; 0350D; 7280E

Article ID: 0253-4177(2004)08-1004-05

\* Project supported by National High Technology Research & Development Program of China(No. 2002AA31116Z)

Ye Xiaojun male, PhD candidate. He is engaged in the development of GaN laser diode.

Received 23 August 2003, revised manuscript received 17 December 2003

©2004 The Chinese Institute of Electronics