

离散谱折射率法优化设计深刻蚀、单模 GaAs/GaAlAs 脊形光波导*

马慧莲 杨建义 江晓清 王明华

(浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027)

摘要: 采用离散谱折射率法对深刻蚀 GaAs/GaAlAs 多层脊形光波导的特性作了详细的理论分析, 并对所获得的较大截面、低损耗的单模脊形光波导的制作容差性作了进一步的分析。计算表明, 用离散谱折射率法获得的单模脊形光波导具有较大的制作容差性。

关键词: 离散谱折射率法; 深刻蚀; GaAs/GaAlAs

EEACC: 0250; 0260; 2520D; 4130; 4140

中图分类号: TN814⁺.6 **文献标识码:** A

文章编号: 0253-4177(2001)04-0481-05

1 引言

脊形光波导是集成光学中一种重要的基本结构, 它是构成其他有源、无源光器件的基础。为获得较大脊宽的III-V族半导体材料的单模光波导, 常常采用浅刻蚀(只刻蚀光波导上限制层或波导芯层的一部分)的波导结构, 这种脊形波导端面和单模光纤芯径在竖直(垂直于衬底)方向严重失配。并且, 在浅刻蚀脊波导中, 由于刻蚀深度直接影响脊内传播模式, 故必须加以精确控制。在竖直(垂直于衬底)方向光场得到较强的限制, 而水平(平行于衬底)方向, 由于脊波导内外折射率差很小, 故对光场的限制一般较弱, 很难获得低损耗的多模干涉(Multi-Mode Interference, MMI)型器件^[1]; 为保证相邻波导间较小串音, 波导间隙也常常较大。为此, 人们研究并发展了深刻蚀(将波导层完全刻蚀掉后, 再刻蚀掉下限制层的一部分)脊形波导结构。利用这种强限制波导结构, 可以满足 MMI 器件的精确自镜像(Self-Imaging)要求, 从而获得较高性能的 MMI 器件。由于脊外常常是空气, 故这种波导结构在水平方向具有最

大的光场限制作用, 从而大大减小相邻波导间串音, 特别是在设计及制作弯曲波导时, 可以获得较小弯曲半径并具有较低的插入损耗^[2]。不同于平板波导, 对三维结构的脊波导的本征方程, 我们无法获得解析解。为此人们发展了许多半解析和纯数值计算方法, 前者具有计算速度快但精度低的缺点, 后者具有高精度但计算速度慢和适用范围小的缺点^[3]。离散谱折射率法^[4]是两者的折衷, 它的快速和高精度在于: 在脊下采用傅里叶变换, 将三维波导结构等效成折射率大小为谱折射率的平板波导, 从而在保证精度的同时大大提高计算速度。

脊形光波导常常制作在高折射率的衬底层上, 特别是在 GaAs/GaAlAs 系材料中。从平板波导理论^[5]可知, 这种高折射率衬底层的波导结构将支持漏模。漏模不同于正常约束的导模, 它会向高折射率层辐射功率。因此我们的离散谱折射率法将基于漏模的观点, 并借此来实现对脊波导内低损耗的传播模式的控制。

2 理论

图 1 给出了典型的深刻蚀 GaAs/GaAlAs 泄漏

* 国家自然科学基金(69677012)和国家重点基础研究发展计划资助项目(G1999033104)。

马慧莲 女, 1975 年出生, 博士研究生, 主要从事光电子器件、集成光学和相关 CAD 研究。

王明华 男, 1941 年出生, 教授, 主要从事半导体材料、器件和集成光学研究。

2000-03-11 收到, 2000-09-02 定稿

© 2001 中国电子学会

波导结构的截面示意图。其中, d 、 n 和 x 分别表示各波导层的厚度、折射率和 GaAlAs 合金中 Al 原子的含量。第一层是宽度为 $2W$ 、厚度假设为无穷大的空气柱, 第二至第五层为脊内波导层, 第六和第七层为脊下波导层, 其中第七层是厚度假设为无穷大的衬底层。这种脊形波导只支持一个低损耗的传播模式的设计原则是: 保证下限制层中第二层(即图示分成 5 和 6 层的区域)的折射率低于基模的有效折射率而高于其他所有高阶模的有效折射率, 从而使得这一层起了一个模式过滤器的作用, 除基模外, 所有其他高阶模都被过滤到衬底中去而成为泄漏模, 最终获得低损耗的单模工作状态。

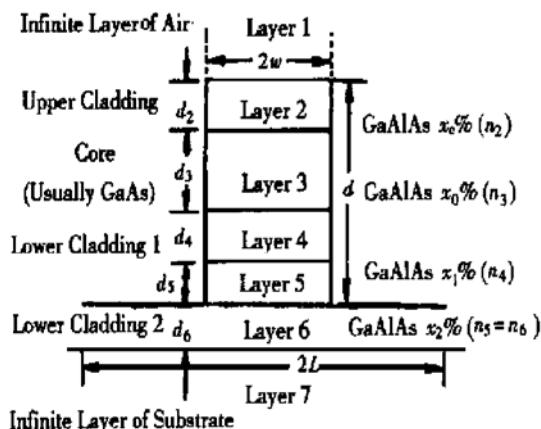


图 1 深刻蚀 GaAs/GaAlAs 脊形光波导结构示意图

FIG. 1 Schematic Diagram of Deep-Etched Single-Mode GaAs/GaAlAs Rib Waveguide

在离散谱折射率法中^[6], 首先将图 1 所示脊波导沿着脊基(虚线所示)分成上下两个区域, 然后对每个区域分别求解相应模式(TE 或 TM 模)的主要场分量的标量波动方程。在考虑了古斯-汉欣位移后, 波导边界周围(除空气和衬底层外)场分布近似为零。在脊内我们采用简单的分离变量的方法分别对水平和竖直方向的场分量进行求解, 脊下采用离散傅里叶变换, 将三维波导结构等效成折射率大小为谱折射率的平板波导, 通过求解等效平板波导来获得相应的脊下场分量。最后利用电场 E 和能量的连续性得到一个等效的变分边界条件, 由此对脊内、脊下场分量进行匹配并获得关于传播常数 β 的超越方程^[6]:

$$F(\beta) = W\Gamma_i - L \sum_{q=1}^N \frac{2b_1 \cos(s_q W)}{L(b_1^2 - s_q^2)} \Gamma_1 = 0 \quad (1)$$

其中 $b_1 = \frac{\pi}{2W}$, $s_q = \frac{(2q-1)\pi}{2L}$ (2)

$2W$ 是考虑了古斯-汉欣位移后的有效脊宽; $2L$ ($L > W$) 为解空间一个合适的宽度范围(如图 1 所示); N 是离散傅里叶变换的最高阶数, 它定义了脊下场与脊内场匹配过程中的分辨率, 具体取值大小与脊波导结构、 $2L$ 大小和具体模式有关, 对于基模, 一般选取 $N = 50$ 已能保证算法精度; Γ_i 和 Γ_1 分别是描述脊内和脊下向脊基的传递函数, 定义如下:

$$\Gamma_{i,1} = \frac{i}{E_{i,1}} \times \frac{\partial E_{i,1}}{\partial y} \quad (3)$$

其中 E_i 和 E_1 分别代表了脊内和脊下的场分量。

由于我们的离散谱折射率法是基于漏模的观点, 故在求解超越方程(1)时, 传播常数 β 将是一个复数。它的实部和虚部分别代表相应模式的有效折射率和损耗, 即:

$$n_{\text{eff}} = \text{Re}(\beta/k), \quad k = 2\pi/\lambda \quad (4)$$

$$\delta = 10^5 \text{Im}(2\beta) \lg(e) \quad \text{dB/cm} \quad (5)$$

其中 Re 和 Im 分别表示取相应复数的实部与虚部; λ 是真空中的波长, 在下面的具体分析中, 我们选取 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$.

3 分析

在图 1 中, 我们使用了两层不同掺 Al($x_1 > x_2$)量的下限制层的主要目的是降低整个外延片的厚度, 同时简化设计过程。第一层的主要作用是控制到达第二层(过滤层)的光总量, 要求这层波导厚度足够厚同时有较低的折射率系数, 以保证基模有较低的光场泄漏, 同时兼顾其他高阶模有较大的光场泄漏。由于下限制层第一层(即总第四层)有较低的折射率系数, 使脊内大部分光场得以限制, 即竖直方向的光场形状大致被决定, 这样使得整个脊形波导的有效折射率主要取决于脊宽 $2W$, 而与下限制层的第二层无关, 即使得 n_{eff} 和 $n_s (= n_6)$ 相互独立, 大大简化了设计过程。由这种深刻蚀单模波导的设计原则可知, 下限制层第二层的折射率越接近于波导芯层, 就越能获得大截面的脊波导, 但考虑到分子束外延(MBE)所能精确控制 GaAlAs 中 Al 原子含量的最小极限, 我们可选取的这层 Al 的最低含量为 7%。从而决定了脊宽 $2W$ 最终可选的取值范围。故在这种深刻蚀脊形波导中, $2W$ 和 $n_s (= n_6)$ 是两个非常关键的参数。

3.1 模式损耗与脊宽 $2W$ 的关系

由于模式有效折射率取决于相应模式在 xy 平

面上的场变化速率, 具有缓变场的模式有较大的有效折射率, 图 2(a) 正是体现了这种性质. 即随着脊宽 $2W$ 的增加, 各个模式的有效折射率都相应地增加. 图 2(a) 中所示虚线为下限制层第二层的有效折射率, 设其与 TE_{00} 模、 TE_{10} 模有效折射率曲线的交点分别为 A 、 B . 结合图 2(b) 不难发现, 当模式有效折射率小于下限制层第二层的有效折射率(即脊宽减小到一定值)时, 相应模式损耗急剧增大, 即发生

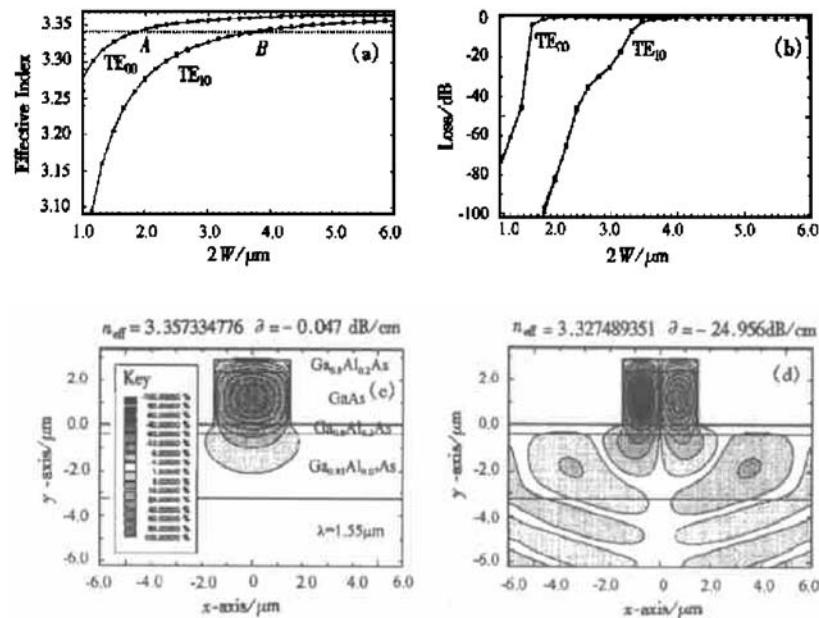


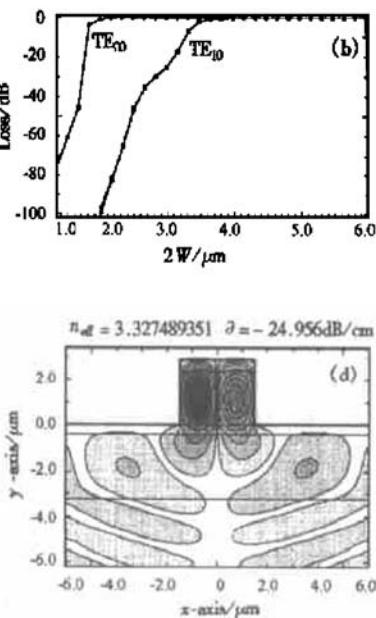
图 2 当 $d = 3.4\mu\text{m}$, $d_2 = 0.5\mu\text{m}$, $d_3 = 2.4\mu\text{m}$, $d_4 = 0.4\mu\text{m}$, $d_5 + d_6 = 2.8\mu\text{m}$, $x_c = 20$, $x_0 = 0$, $x_1 = 20$, $x_2 = 7$ 时, 波导脊宽 $2W$ 的变化对(a)模式有效折射率和(b)模式损耗的影响; (c) 和(d) 分别是当 $2W = 2\mu\text{m}$ 时, TE_{00} 和 TE_{10} 模式的场分布示意图.

FIG. 2 Predicted Values of (a) the Mode Effective Index and (b) Mode Loss Plotted Against Rib Width $2W$ with $d = 3.4\mu\text{m}$, $d_2 = 0.5\mu\text{m}$, $d_3 = 2.4\mu\text{m}$, $d_4 = 0.4\mu\text{m}$, $d_5 + d_6 = 2.8\mu\text{m}$, $x_c = 20$, $x_0 = 0$, $x_1 = 20$, $x_2 = 7$ and Predicted Fields of (c) the TE_{00} Mode and (d) the TE_{10} Mode with $2W = 3\mu\text{m}$

3.2 模式损耗与下限制层第二层掺 Al 浓度和厚度的关系

图 3(a) 描述了当下限制层第二层折射率(n_2)在 3.341(掺 Al 7.5%) 和 3.461(掺 Al 6.5%) 之间变化时对模式损耗的影响. 由于每个模式损耗的大小直接依赖于该模式 $n_{\text{eff}} = n_2$ 时截止点附近的有效脊宽. 在图 3(a) 所分析的脊波导结构中, 由于我们的脊宽是相对于下限制层第二层折射率大小为 3.344(掺 Al 7%) 时的有效脊宽($3\mu\text{m}$), 故当下限制层第二层掺 Al 浓度在 6.5%—7.5% 之间变化时, 掺 Al 为 7% 时的最佳脊宽对于高阶模将偏小或偏大, 相应地, 模式损耗将增大或减小. 故对于这一层的掺

了强烈的泄漏. 为保证基模有较低的光场泄露而同时兼顾其他高阶模(考虑 TE_{10} 模)有较高的光场泄漏, 我们可选择的脊宽 $2W$ 范围为 1.8—3.8 μm (脊宽上下限分别由 A 、 B 两点在水平轴上的垂足决定). 图 2(c)、(d) 分别给出了当脊宽 $2W$ 为 $3\mu\text{m}$ 时的 TE_{00} 和 TE_{10} 模式的场分布示意图. 从图 2(d), 我们不难发现, 此时, TE_{10} 模发生了强烈的泄漏.



Al 浓度应精确控制, 因为它直接影响着有效脊宽的确定.

图 3(b) 描述了当下限制层第二层厚度在 2.4—3.6 μm 范围内变化时对模式损耗的影响. 由于这一层在整个波导结构中起了一个模式过滤器的作用, 其厚度的改变直接影响着漏模向衬底的泄漏速率. 从图 3(b) 可以发现, 当厚度增大时, 模式损耗除对基模影响较小外, 对高阶模(以 TE_{10} 为代表) 损耗影响先是线性减小, 后逐渐趋向平缓. 为保证基模有较低的光场泄漏, 同时兼顾其他高阶模有较大的光场泄漏, 我们只需将下限制层第二层厚度控制在 2.4—3.0 μm .

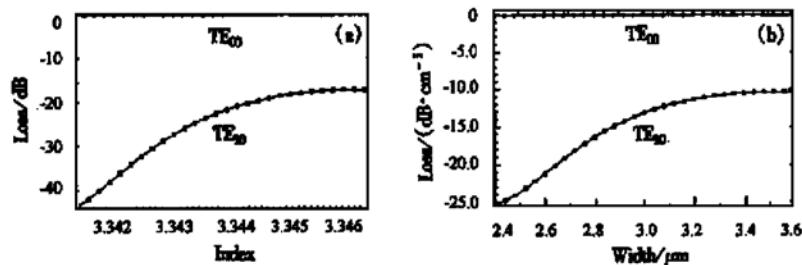


图 3 当 $2W = 3\mu\text{m}$, $d_2 = 3.4\mu\text{m}$, $d_2 = 0.5\mu\text{m}$, $d_3 = 2.4\mu\text{m}$, $d_4 = 0.4\mu\text{m}$, $x_c = 20$, $x_0 = 0$, $x_1 = 20$ (a) $d_5 + d_6 = 2.8\mu\text{m}$ 时, 下限制层第二层折射率的变化对模式损耗的影响; (b) $x_1 = 7$ 时, 下限制层第二层厚度的变化对模式损耗的影响

FIG. 3 When $2W = 3\mu\text{m}$, $d_2 = 3.4\mu\text{m}$, $d_2 = 0.5\mu\text{m}$, $d_3 = 2.4\mu\text{m}$, $d_4 = 0.4\mu\text{m}$, $x_c = x_1 = 20$, $x_0 = 0$, Predicted Values of (a) the Mode Effective Index with $d_5 + d_6 = 2.8\mu\text{m}$ and (b) Mode Loss Plotted Against Depth of the Second Lower Cladding Layer with $x_2 = 7$

3.3 模式损耗与下限制层第一层厚度的关系

下限制层第一层的主要作用是控制到达下限制层第二层的光总量。当这一层厚度减薄时, 我们可通过增大下限制层第二层厚度来减小模式泄漏, 但从降低整片材料厚度出发, 由于这一层较下限制层第二层有较低的折射率, 即光强限制作用较强, 故太薄的这一层, 将使下限制层第二层变得很厚, 因此这一层厚度不宜太薄。然而, 当这一层厚度较厚时, 这种

脊波导结构在竖直方向将支持多个低损耗的传播模式(如图 4 所示)。故我们须将这一层厚度控制在 $0.3\text{--}0.5\mu\text{m}$ 之间。

3.4 模式损耗与刻蚀深度的关系

在 GaAs/GaAlAs 系材料中, 为获得深刻蚀的脊波导结构, 常常采用干法刻蚀。利用激光反射计, 使刻蚀过程停止在所需深度 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 处。从图 5 可见, 在这个范围内, 刻蚀深度对模式损耗的影响不大。

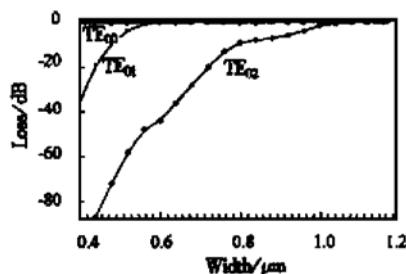


图 4 当 $2W = 3\mu\text{m}$, $d_2 = 0.5\mu\text{m}$, $d_3 = 2.4\mu\text{m}$, $d_5 = 0.1\mu\text{m}$, $d_6 = 2.7\mu\text{m}$, $x_c = x_1 = 20$, $x_0 = 0$, $x_2 = 7$ 时, 下限制层第一层厚度的变化对模式损耗的影响

FIG. 4 Predicted Values of Mode Loss Plotted Against the Depth of the First Lower Cladding Layer with $2W = 3\mu\text{m}$, $d_2 = 0.5\mu\text{m}$, $d_3 = 2.4\mu\text{m}$, $d_5 = 0.1\mu\text{m}$, $d_6 = 2.7\mu\text{m}$, $x_c = x_1 = 20$, $x_0 = 0$, $x_2 = 7$

3.5 模式损耗与上限制层的关系

上限制层主要起改善波导出射光斑的作用, 对其厚度和折射率的控制精度都不是很高。一般我们

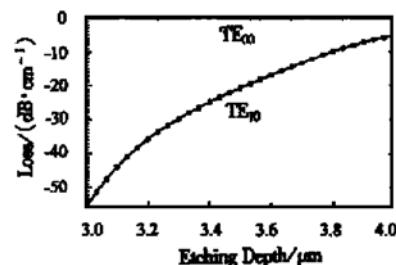


图 5 当 $2W = 3\mu\text{m}$, $d_2 = 0.5\mu\text{m}$, $d_3 = 2.4\mu\text{m}$, $d_4 = 0.5\mu\text{m}$, $d_5 + d_6 = 2.8\mu\text{m}$, $x_c = x_1 = 20$, $x_0 = 0$, $x_2 = 7$ 时, 刻蚀深度对模式损耗的影响

FIG. 5 Predicted Values of Mode Loss Plotted Against the Etch Depth with $2W = 3\mu\text{m}$, $d_2 = 0.5\mu\text{m}$, $d_3 = 2.4\mu\text{m}$, $d_4 = 0.5\mu\text{m}$, $d_5 + d_6 = 2.8\mu\text{m}$, $x_c = 20$, $x_0 = 0$, $x_1 = 20$, $x_2 = 7$

从尽可能降低整片材料厚度出发, 选取其厚度为 $0.5\mu\text{m}$, 掺 Al 量为 20%。然而当上限制层厚度改变时, 只要相应地改变刻蚀深度, 即保证刻到下限制层第二层的深度不变, 最后对模式损耗几乎没有变化。

4 总结

本文详细分析了深刻蚀脊形光波导在设计和制作过程中, 波导脊宽、上下限制层厚度、下限制层第二层掺 Al 量及刻蚀深度对模式损耗和有效折射率的影响。从本文分析可知, 这种深刻蚀脊形光波导除高阶模模式损耗对波导脊宽和下限制层第二层掺 Al 量较为敏感外, 对其他一些结构参数控制精度要求都不高。故进一步证实了这种深刻蚀脊形光波导具有很好的制作容差性, 这对于结构紧凑的高性能多模干涉(MMI)型器件、弯曲波导和分支结构等的制作具有重要的意义。

参考文献

- [1] J. Z. Huang, M. H. Hu, J. Fujita *et al.*, IEEE Photonics Technol. Lett., 1998, **10**(4): 561—563.
- [2] K. T. Koai and P. L. Liu, J. Lightwave Technol., 1989, **7**: 1016—1021.
- [3] K. S. Chiang, Optical and Quantum Electronics, 1994, **26**: S113—S134.
- [4] P. C. Kendall, M. S. Stern and P. N. Roboson, Optical and Quantum Electronics, 1990, **22**: 555—560.
- [5] R. Ulrich and W. Prettl, J. Appl. Phys., 1973, **1**: 55—68.
- [6] G. M. Berry, S. V. Burke, J. M. Heaton *et al.*, Electron. Lett., 1993, **29**: 1941—1942.

Optimization of Deep-Etched, Single-Mode GaAs/GaAlAs Optical Rib Waveguides Using Discrete Spectral Index Method*

MA Hui-lian, YANG Jian-yi, JIANG Xiao-qing and WANG Ming-hua

(Department of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A more detailed analysis of deep-etched, single-mode GaAs/GaAlAs multiple-layer optical rib waveguides is presented using the discrete spectral index method (DSIM). The fabrication tolerance of the obtained low-loss, single-mode optical rib waveguides with a large mode size is analysed as well. The result indicates that single-mode rib waveguides obtained by this method have large fabrication tolerance.

Key words: DSIM; deep etching; GaAs/GaAlAs

EEACC: 0250; 0260; 2520D; 4130; 4140

Article ID: 0253-4177(2001)04-0481-05

* Project Supported by National Natural Science Foundation of China Under Grant No. 69677012 and National Major Basic Research Development Program of China Under Grant No. G1999033104.

MA Hui-lian female, was born in 1975. She is a Ph. D. Student, working in the fields of optoelectronic devices, integrated optics and related CAD.

WANG Ming-hua male, was born in 1941. He is a professor, working in the fields of semiconductor materials and devices, integrated optics.

Received 11 March 2000, revised manuscript received 2 September 2000

© 2001 The Chinese Institute of Electronics