

基于 GaAs/GaAlAs 条形光波导的定向耦合器分析

肖金标, 孙小菡, 张明德, 丁 东

(东南大学电子工程系, 江苏南京 210096)

摘要: 运用基于级数展开法 (SEM) 的三维光束传播法 (3D-SEM-BPM) 分析了由 GaAs/GaAlAs 条形光波导构成的定向耦合器, 获得了这种定向耦合器所承载的偶模及奇模电场分布, 其耦合长度随波导间距的增加近似指数增长. 模拟了光波在器件中的传输演变情况, 用条形光波导的基模在给定定向耦合器的左通道激励, 传输 2.62mm 之后模场转移至右通道, 获得了交叉态 (Cross State). 另外, 3D-SEM-BPM 最终将 BPM 基本方程归结为一阶常微分方程组, 方法简单; 导出矩阵小, 计算效率高. 处理边界条件时, 引入正切函数变换将无限平面映射成单位平面, 避免了边界截断问题.

关键词: GaAs/GaAlAs; 条形光波导; 定向耦合器; 三维光束传播法 (3D-BPM); 级数展开法 (SEM)

中图分类号: TN25 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2002)05-0705-03

Analysis of the Directional Coupler Based on the GaAs/GaAlAs Optical Strip Waveguide

XIAO Jin biao, SUN Xiao han, ZHANG Ming de, DING dong

(Dept. of Electronics Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: The directional coupler based on the GaAs/GaAlAs optical strip waveguide is analyzed using three dimensional beam propagation method based on the series expansion method (3D-SEM-BPM). The even and odd modes supported by this coupler are obtained, respectively, and the coupling length exponentially increases with the increasing of the waveguide separation. The simulation results for the injected field through the present device are also gotten, and the excitation selected as the fundamental mode supported by the single optical strip waveguide at left channel is transferred into the right channel after propagating 2.62mm, thus the cross state is obtained. The 3D-SEM-BPM reduces the basic BPM equation to the first order normal differential equation system. Consequently, the computational program is simple. Moreover, the calculation is efficient due to the small matrix derived from the present method. In dealing with the boundary conditions, a tangent type function is applied to map the infinite space into a unit square. As a result, the boundary truncation is eliminated.

Key words: GaAs/GaAlAs; optical strip waveguide; directional coupler; three dimensional beam propagation method (3D-BPM); series expansion method (SEM)

1 引言

光波导型光开关是光通信系统及光信号处理系统中的关键器件, 而基于条形光波导的定向耦合器是构成光波导型光开关的典型结构. 目前, 人们对以 LiNbO_3 材料为衬底的定向耦合器做了大量的研究工作, 并取得了显著成绩^[1]; 而 GaAs/GaAlAs 材料也具有良好的光、电性能, 较 LiNbO_3 材料更容易实现各种光电子器件的单片集成, 且不易受 DC 漂移及光损伤的影响, 是制作集成化光电子器件的理想材料, 故倍受重视^[2]. 本文分析由 GaAs/GaAlAs 条形光波导构成的定向耦合器, 包括耦合长度与波导间距的变化关系; 所承载的偶模与奇模的电场分布及光场在定向耦合器中的传输演变情况.

耦合模理论^[3]是分析定向耦合器的传统方法, 可以分析不同、相同模之间的耦合, 但难以分析模场的分布及畸变; 光

束传播法 (BPM) 能够对本征模、辐射模、模间耦合及模转换问题作统一处理, 对模场的分布、传输、畸变具有直观可知的特点, 是分析波导光电子器件的有力工具^[4]. 基于级数展开法 (SEM) 的光束传播法 (SEM-BPM)^[5] 最终将 BPM 基本方程归结为一阶常微分方程组, 较有限差分 BPM (FD-BPM) 及有限元 BPM (FE-BPM) 具有导出矩阵小, 方法简单等优点^[4]. 但二维 SEM-BPM (2D-SEM-BPM)^[5] 应用于三维光电子器件时尚须借助有效折射法 (EIM)^[6] 将三维问题简化为二维问题, 只适用于折射率缓慢变化的三维光电子器件, 在处理弯曲光波导及多模光波导时也有较大的困难, 故本文将将其扩展成三维形式 (3D-SEM-BPM), 并用它来分析基于条形光波导的定向耦合器. 另外, 处理边界条件时, 引入正切函数变换^[7] 将无限域转换成有限域, 没有边界截断问题, 有较高的计算精度.

收稿日期: 2001-07-28; 修回日期: 2001-11-25

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金 (No. 98028638)

2 理论方法

傍轴近似的三维标量 BPM 基本方程为

$$\frac{\partial^2 u(x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x, y, z)}{\partial y^2} - 2jk_0 \bar{n} \frac{\partial u(x, y, z)}{\partial z} + k_0^2 [n^2(x, y, z) - \bar{n}^2] u(x, y, z) = 0 \quad (1)$$

式中 k_0 为自由空间波数, \bar{n} 为参考折射率, $n(x, y, z)$ 为光波导光电子器件的折射率分布, $u(x, y, z)$ 为待求电场。

引入如下变量变换

$$x = -\alpha_x \cot(\pi\xi) \quad (2a)$$

$$y = -\alpha_y \cot(\pi\eta) \quad (2b)$$

式中 α_x, α_y 为转换比例因子, 无限平面 $x \in [-\infty, +\infty], y \in [-\infty, +\infty]$ 则映射成单位平面 $\xi \in [0, 1], \eta \in [0, 1]$ 。此时方程(1)变为

$$\left(\frac{d\xi}{dx}\right)^2 \frac{\partial^2 u(\xi, \eta, z)}{\partial \xi^2} + \frac{d^2 \xi}{dx^2} \frac{\partial u(\xi, \eta, z)}{\partial \xi} + \left(\frac{d\eta}{dy}\right)^2 \frac{\partial^2 u(\xi, \eta, z)}{\partial \eta^2} + \frac{d^2 \eta}{dy^2} \frac{\partial u(\xi, \eta, z)}{\partial \eta} - 2jk_0 \bar{n} \frac{\partial u(\xi, \eta, z)}{\partial z} + k_0^2 [n^2(\xi, \eta, z) - \bar{n}^2] u(\xi, \eta, z) = 0 \quad (3)$$

将电场 $u(\xi, \eta, z)$ 在区间 $\xi \in [0, 1], \eta \in [0, 1]$ 展开

$$u(\xi, \eta, z) = \sum_{m=1}^{N_x} \sum_{n=1}^{N_y} C_{mn}(z) \varphi_m(\xi) \varphi_n(\eta) \quad (4)$$

式中正整数 N_x, N_y 分别为 ξ, η 方向上所取基函数的项数, $C_{mn}(z)$ 为展开系数。展开基函数取一组正交完备的正弦函数

$$\varphi_m(\xi) = \sqrt{2} \sin(m\pi\xi) \quad (5a)$$

$$\varphi_n(\eta) = \sqrt{2} \sin(n\pi\eta) \quad (5b)$$

显然, 该基函数在边界 $\xi = 0, 1$ 及 $\eta = 0, 1$ 上自然满足边界条件, 因此没有边界截断问题。将式(4)代入方程(3), 两边乘以 $\varphi'_m(\xi) \varphi'_n(\eta)$ 后在区间 $\xi \in [0, 1], \eta \in [0, 1]$ 上作积分, 得到

$$\sum_{m=1}^{N_x} \sum_{n=1}^{N_y} \left[R'_{m'n'm} \frac{dC_{mn}(z)}{dz} + S'_{m'n'm}(z) C_{mn}(z) \right] = 0 \quad (6)$$

其中

$$R'_{m'n'm} = -2jk_0 \bar{n} \int_{\xi=0}^1 \int_{\eta=0}^1 \varphi'_m(\xi) \varphi'_n(\eta) \varphi_m(\xi) \varphi_n(\eta) d\xi d\eta = -2jk_0 \bar{n} \delta'_{m'n'} \delta_{mn} \quad (7)$$

$$S'_{m'n'm} = \sum_{k=1}^4 I_k + \int_{\xi=0}^1 \int_{\eta=0}^1 k_0^2 n^2(\xi, \eta, z) \varphi'_m(\xi) \varphi'_n(\eta) \varphi_m(\xi) \varphi_n(\eta) d\xi d\eta - k_0^2 \bar{n}^2 \delta'_{m'n'} \delta_{mn} \quad (8)$$

式中 $I_k (k = 1 \sim 4)$ 为四个二重积分, 文献[7]有其解析表达式。方程(6)实际为一阶常微分方程组, 因此只要给定初始激励, 如给定 $u(\xi, \eta, z=0)$ 可方便快速地获得 $z > 0$ 之后的电场分布。另外, 令方程(6)中的 $d/dz = 0$, 则方程(6)退化为标准本征值方程, 可以用来求解定向耦合器所承载的偶、奇模之有效折射率 n_e, n_o , 从而获得其耦合长度及其模场分布; 在分析定向耦合器的光波传输问题时, 作为初始激励的条形光波导所承载的基模用同样方法获得, 其中其基模的有效折射率选作为参考折射率。

3 数值结果

图1示出了由两平行条形光波导所构成的定向耦合器, 其中衬底材料为 GaAlAs, 通过控制 Al 的浓度可调节 GaAlAs 的折射率 n_s , 本文选择 $n_s = 3.36$; 光波导芯层为 GaAs, 折射率 $n_f = 3.44$, 工作波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 。

转换比例因子 α_x, α_y 须优化选择, 以使方程(6)快速收敛并保证模场不弯曲变形, 根据文献[7], 如图1所示的定向耦合器选取 $\alpha_x = w + d/2$ 及 $\alpha_y = h/2$ 可满足要求。

首先用本文方法计算阶跃(SI)光纤所承载的基模以验证其精度, 光纤参数为: 纤径 $4.15 \mu\text{m}$, 包层与纤芯折射率分别为 1.4457、1.4511, 工作波长为 $1.55 \mu\text{m}$, $N_x = N_y = 18$ 。计算出的基模有效折射率为 1.448117, 精确值为 1.448126, 误差仅 0.001%, 图2给出了 $y = 0$ 时的基模电场分布, 由图可见, 计算出的电场与精确解吻合较好, 说明本文方法是一种高精度的数值方法。

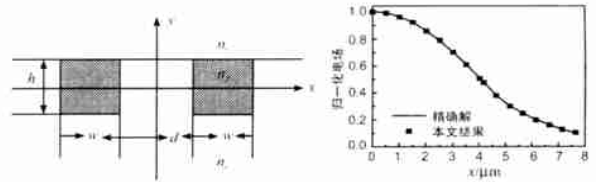


图1 基于条形光波导的定向耦合器横向尺寸

图2 阶跃光纤基模电场分布

下面分析如图1所示的定向耦合器的耦合长度 l_c 与光波导间距 d 的变化关系。其中耦合长度 l_c 定义为:

$$l_c = \frac{\lambda}{2(n_e - n_o)} \quad (9)$$

式中 n_e, n_o 分别为定向耦合器所承载的偶、奇模之有效折射率; 其它参数为: $w = 3 \mu\text{m}, h = 1.5 \mu\text{m}, n_e = 1.0$ (空气), $N_x = N_y = 23$ 。图3给出了计算结果, 由图3可见耦合长度 l_c 随光波导间距 d 的增加近似指数增长, 说明其耦合能力随光波导间距 d 的增加呈指数衰减。图5给出了 $d = 1.0 \mu\text{m}$ 时偶、奇模的电场分布, 由图5可见模场在空气包层中迅速衰减, 明显向衬底幅射。

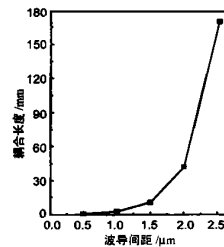


图3 耦合长度与波导间距的关系

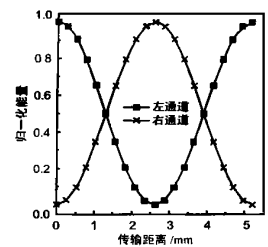


图4 左、右通能量随传输距离的关系

最后分析光波在定向耦合器的传输问题, 其中波导间距 $d = 1 \mu\text{m}$, 其它参数同前。用条形光波导的基模在左通道激励, 参考折射率 $\bar{n} = 3.4099$, 为条形光波导的基模有效折射率。图

6 给出了计算结果. 由图可见, 在传输过程中模场逐渐向右通道转移, 传输至 2.62mm 时模场已转移到右通道, 称之为交叉态(Cross state), 说明其耦合长度为 2.62mm. 图 4 给出了定向

耦合器左、右通道的能量随传输距离的关系, 模场传输至 5.24mm 时将返回到左通道, 称之为直通态(Bar state). 能量在左、右通道交替变化往前传输.

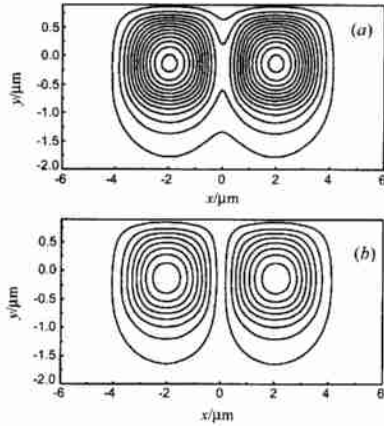


图 5 定向耦合器所承载的偶、奇模电场分布
(a) 偶模, (b) 奇模

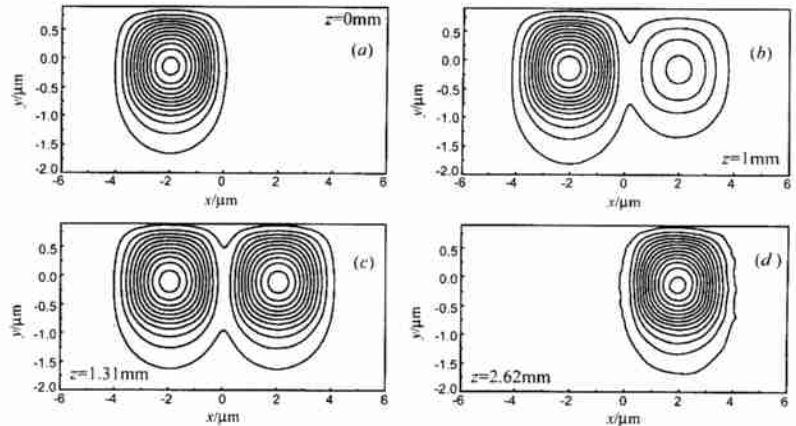


图 6 输入激励随传输距离的演变情况. (a) $z=0\text{mm}$; (b) $z=1\text{mm}$; (c) $z=1.31\text{mm}$;
(d) $z=2.62\text{mm}$

4 结论

本文尝试运用基于级数展开法(SEM)的三维光束传播法(3D-SEM BPM)来分析由 GaAs/GaAlAs 条形光波导所构成的定向耦合器. 其耦合长度随波导间距的增加近似指数增长, 说明其耦合能力随波导间距的增加呈指数衰减; 给出了定向耦合器所承载的偶、奇模电场分布; 模拟分析了光波在定向耦合器中的传输演变情况. 3D-SEM BPM 最终将 BPM 基本方程归结为一阶常微分方程组, 方法简单; 导出矩阵小, 计算效率高. 另外, 处理边界条件时, 引入正切函数变换将无限 $x-y$ 平面映射成单位平面, 使单位平面边界上的电磁场自然为零, 避免了边界截断问题, 提高了计算精度.

参考文献:

- [1] Wooten E L, Kissa K M, Alfredo Y Y, et al. A review of lithium niobate modulators for fiber-optic communications system [J]. IEEE J Selected Topics In Quantum Electronics, 2000, 6(1): 69- 82.
- [2] Walker R G. High speed III-V semiconductor intensity modulator [J]. IEEE J Quantum Electronics, 1991, 27(3): 654- 667.
- [3] Griffel G, Itzkovich M, Hardy A A. Coupled mode formulation for directional couplers with longitudinal perturbation [J]. IEEE J. Quantum Electronics, 1991, 27(4): 985- 994.

- [4] Scamozzino R, Gopinath A, Pregla A, et al. Numerical techniques for modeling guided wave photonics devices [J]. IEEE J Selected Topics in Quantum Electronics, 2000, 6(1): 151- 162.
- [5] Qing W P, Fang D G, Huang W P. A new bpm algorithm based on the series expansion method [J]. Microwave & Optical Technol Lett, 2000, 24(2): 125- 129.
- [6] Chiang K S. Analysis of rectangular dielectric waveguides: effective index method with built-in perturbation correction [J]. Electronics Lett, 1992, 28(4): 388- 390.
- [7] Hewlett S J, Ladouceur F. Fourier decomposition method applied to mapped infinite domains: scalar analysis of dielectric waveguides down to modal cutoff [J]. J Lightwave Technol, 1995, 13(3): 357- 383.

作者简介:



肖金标 男, 1969 年 11 月生于江西于都, 东南大学电子工程系博士研究生, 主要研究方向为全光网及其关键光电子器件的设计.

孙小菡 女, 1955 年 6 月生, 东南大学电子工程系教授, 博士生导师, 主要研究领域为光波电子学与光通信网络.