

文章编号: 1002-1582(2025)06-0669-06

基于矩形波导色散关系的相变光开关设计

杨子航, 张桂菊*, 沈为民

(1. 苏州大学 光电科学与工程学院, 江苏 苏州 215006)

(2. 江苏省先进光学制造技术重点实验室&教育部现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006)

摘 要: 矩形波导是平面集成光路器件中最重要的结构单元, 其色散特性影响整个器件性能。文章采用 Marcatili 解析法与建模法, 对比求解单条形和脊形两种矩形波导结构的模有效折射率和传播常数, 并针对片上波导器件的本征传输损耗进行结构优化。结果表明, 一定波导宽度下, 同种模式在脊形波导中有更大的有效折射率和更低的传输损耗。对一种基于脊形波导的相变型光开关单元器件进行优化设计, 在工作波长为 1520~1580nm 范围内, 获得插入损耗均小于 0.07dB, TE₀ 和 TM₀ 模传输下的消光比分别为 15.73~17.70dB 和 15.78~17.65dB; 光开关具有良好的低损耗传输特性和偏振不敏感性。研究将为求解光波导色散特性及片上集成波导器件的设计和性能优化提供可靠依据。

关 键 词: 矩形波导; 模式色散; 等效折射率; 平面集成光学; 相变光开关

中图分类号: TN252

文献标识码: A

Design of phase change optical switch based on dispersion relation of rectangular waveguide

YANG Zihang, ZHANG Guiju*, SHEN Weimin

(1. School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China)

(2. Key Lab of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province & Key Lab of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, Suzhou 215006, China)

Abstract: Rectangular waveguides are the most important elements in planar integrated optical devices, with their dispersion characteristics greatly influencing the device performances. In this study, Marcatili analytical method and modeling method are used to calculate mode effective refractive indices and propagation constants for both stripe and ridge waveguides. A design and optimization are discussed for the intrinsic transmission loss of on-chip waveguide devices. The results show that guided modes exhibit higher effective refractive indices and lower propagation losses in ridge waveguides than those in strip waveguides. An optimization design of phase change optical switch based on ridge waveguide exhibits a low insert loss (IL) below 0.07dB, good extinction ratio of 15.73 ~ 17.70dB for TE₀ mode and 15.78 ~ 17.65dB for TM₀ mode, during the work wavelength from 1520 ~ 1580nm. Such optical switches present low transmission losses and good polarization insensitivity. The research will provide reliable basis for solving the dispersion characteristics of this simple rectangular planar geometry such as optical switch and coupler for on-chip integrated waveguide devices.

Keywords: rectangular waveguides; mode dispersion; effective refractive index; integrated optics; phase change switch

收稿日期: 2025-05-11; 收到修改稿日期: 2025-07-22

基金项目: 先进光学遥感技术北京市重点实验室开放基金 (AORS202406)

作者简介: 杨子航 (2000—), 男, 硕士研究生, 从事微纳光波导器件设计。

张桂菊 (1977—), 女, 副教授, 博士, 从事光学材料与功能光子学器件、光学传感及应用研究。

* 通讯作者: gjzhang@suda.edu.cn

0 引 言

光波导器件是集成光子学领域的研究热点，随着结构与材料等日益完善，平面集成光路（Planar Lightwave Circuits, PLC）的性能得到进一步拓展并极大的压缩尺寸^[1-3]。矩形波导中的光场横截面受两维方向限制，具有尺寸小、结构简单和易集成的特点，在可编程光子电路^[4,5]、光子神经网络^[6-8]、光子存储器^[9,10]、光通信和智能光子计算^[11-15]等集成片上光波导器件与系统中具有重要应用。分析波导中的光波模式传输特性是设计光子器件的必要前提，也可通过模式调控预测并提高波导器件性能。

矩形波导研究涉及求解复杂的二维电磁场问题，求解方法主要有解析方法和数值计算方法。Marcatili提出对矩形介质波导分区处理，进行导模传输约束条件的求解^[16]，具有简单、概念清晰和实用的特点，在多种波导材料中得以广泛研究与应用^[17-20]。2020年，Mohammad^[19]提出利用 Marcatili 方法用于研究产生人工表面等离子体的周期性金属波导，其准确性与全波模拟仿真计算精度相当。2024年，Tarek^[20]将平面波散射法与 Marcatili 方法结合，提出用于芯层材料与衬底材料折射率差较大的场景，并解释了在高折射率差条件下 TE 和 TM 模式间的极化耦合。

对于复杂的多层波导结构，解析法面临推导难度大和求解结果精确度低等问题。利用有限元方法^[21,22]，对更为复杂的波导结构建立模型进行数值求解，可获得高精度色散计算结果。例如，在光波导开关应用中，Wu 等^[23]在 Si_3N_4 波导层上建立用于可编程光子网络的相变薄膜 GST ($\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$) 阵列结构，实现 TE_0 和 TE_1 混合模式的分级传输。Li 等^[24]建立基于 $\text{Si}/\text{Si}_3\text{N}_4$ 、 SiO_2 、GST 及 ITO 的 5 层结构波导，用于相变数据存储器件的应用，通过建立有限差分模型分析了多层波导结构中的模式传输特性，并指导多级相变波导器件设计。

本文针对 Marcatili 解析法和基于有限差分的建模法在矩形波导的色散关系求解中的特点和适用性进行讨论，针对片上波导器件的传输损耗问题进行波导宽度优化。并以一种基于脊形波导的相变型光开关结构为例，进行单元器件优化设计。

1 矩形波导模型

图 1 给出两种典型的矩形波导结构模型。条形波导结构中，折射率为 n_1 的波导芯层放置在折射率为 n_2 的衬底层上，芯层之上通常会沉积折射率

为 n_3 的覆盖层防止芯层氧化，如图 1 (a) 所示。脊形波导结构中，条形芯层与衬底层之间存在一层与芯层材料相同的过渡层，如图 1 (b) 所示。其中，波导芯层宽度为 w ，厚度为 h ，过渡层厚度为 t 。本文考虑在绝缘衬底硅 (SOI) 上进行平面光波导开关设计，取 Si 波导芯层厚度 h 为 220nm。

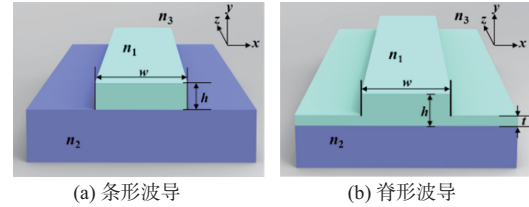


图 1 矩形波导结构示意图

2 模有效折射率分析

采用解析法和建模法，分别对矩形条形和矩形脊形两种结构中的导模有效折射率随波导宽度的变化关系进行分析，讨论两种算法的特点及对平面波导器件设计的适用性。

根据 Marcatili 思想，对波导横截面进行九宫格分区，如图 2 所示。波导芯层为折射率 n_1 区域，其上、下与左、右两侧分别为 n_3 、 n_2 区域和 n_5 、 n_4 区域。当模式远离截止时，电磁场能量分布主要集中在 $n_1 \sim n_5$ 区域，四个边缘角落区域贡献微弱，计算中忽略不计，即可大大简化电磁场的边值问题。对单条形波导，区域 n_5 、 n_4 与 n_3 一般为波导的覆盖层材料，如图 2 (a) 所示。对于脊形波导结构，区域 n_1 的两侧为折射率复合区，如图 2 (b) 所示，其中 n_5 、 n_4 区域的折射率等效为 N 表示，且 $N = n_1 \times t/h + n_3 \times (1 - t/h)$ 。

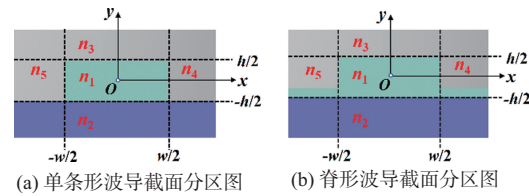


图 2 Marcatili 解析法分区示意图

满足横场传输的模式可为两类^[16]：分量为 E_x 、 H_y 的 E_{mn}^x 模，即准 TE 模式；分量为 E_y 、 H_x 的 E_{mn}^y 模，即准 TM 模式。 m 、 n 分别代表主分量 E 和 H 在 x 和 y 方向上的极大值数量，最小取值均为 1。将二维矩形波导的横向传播常数求解问题等效为两个一维方向受限的波导进行求解，即矩形波导芯层看作两个方向上的无限大平板波导芯层的叠加，等效结构如图 3 所示。单条形波导两个一维等效模型如图 3 (a) 和 (b) 所示，根据电磁场传输边界条件，单条形波导中的模式传输本征方程为

$$\begin{cases} k_x w = p\pi + \arctan\left(\frac{n_1^2}{n_3^2} \frac{\alpha_{4x}}{k_x}\right) + \arctan\left(\frac{n_1^2}{n_3^2} \frac{\alpha_{5x}}{k_x}\right), & p = 0, 1, 2, \dots \\ k_y h = q\pi + \arctan\left(\frac{\alpha_{2y}}{k_y}\right) + \arctan\left(\frac{\alpha_{3y}}{k_y}\right), & q = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (1)$$

式中, k_x 和 k_y 分别是模式场在 x 和 y 方向上的横向传播常数, α_{2y} 和 α_{3y} 是 y 方向的横向衰减系数, α_{4x} 和 α_{5x} 是 x 方向的横向衰减系数: $\alpha_{4x}^2 = \alpha_{5x}^2 = k_0^2(n_1^2 - n_3^2) - k_x^2$,

$$\alpha_{2y}^2 = k_0^2(n_1^2 - n_2^2) - k_y^2; \alpha_{3y}^2 = k_0^2(n_1^2 - n_3^2) - k_y^2.$$

脊形波导的两个一维等效模型如图 3 (c) 和 (d)

所示, 其模式传输本征方程表示为

$$\begin{cases} k_x w = p\pi + \arctan\left(\frac{n_1^2}{n_3^2} \frac{\alpha'_{4x}}{k_x}\right) + \arctan\left(\frac{n_1^2}{n_3^2} \frac{\alpha'_{5x}}{k_x}\right), & p = 0, 1, 2, \dots \\ k_y h = q\pi + \arctan\left(\frac{\alpha'_{2y}}{k_y}\right) + \arctan\left(\frac{\alpha'_{3y}}{k_y}\right), & q = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (2)$$

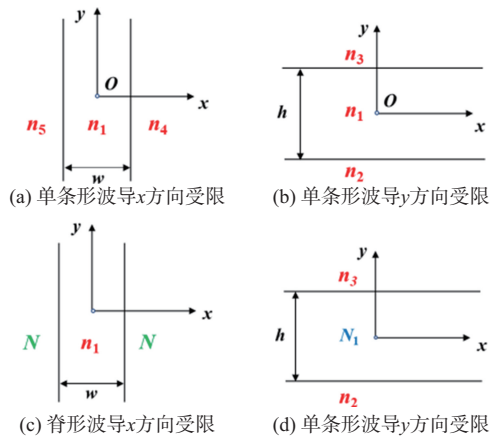


图3 矩形波导芯层的一维受限等效示意图

脊形结构的折射率复合区 N 在 y 方向受限下波导芯区的等效折射率变为 N_1 , 且 $N_1^2 = n_1^2 - (k_x/k_0)^2$ 。式中横向衰减常数: $(\alpha'_{4x})^2 = (\alpha'_{5x})^2 = k_0^2(n_1^2 - N^2) - k_x^2$; $(\alpha'_{2y})^2 = k_0^2(N_1^2 - n_2^2) - k_y^2$; $(\alpha'_{3y})^2 = k_0^2(N_1^2 - n_3^2) - k_y^2$ 。模式纵向传播常数 β 与 k_x 和 k_y 正交, 且 $\beta^2 = k_0^2 n_1^2 - k_x^2 - k_y^2$, 根据式 (1) 和 (2) 求出波导中不同阶次导模的传播常数和有效折射率 N_{eff} , 进而在平面波导器件设计中确定光波能量传输效率或损耗特性。

为了对比 Marcatili 解析法的准确度, 利用有限差分算法 (Finite Difference Method, FDM) [25] 建模计算两种矩形波导的模式有效折射率和传播常数, 并进行对比。采用 Ansys Lumerical 软件中的 FDE (Finite-Difference Eigenmode) 模块进行建模。FDM 在笛卡尔坐标系下对波导横截面进行网格划分, 使得波导结构及电磁场分布离散化, 将求解 Maxwell 方程转化为求解矩阵特征值问题, 并通过稀疏矩阵求解出模式的特性。建模法不限制波导截面的形状, 也不受限于材料多样性和结构复杂性, 在高度集成的复杂光子器件设计中有很大的优势。

图 4 给出两种矩形波导结构下准基模 (TE0) 的有效折射率计算结果。条形波导中, 采用解析

法和模型法分别获得 TE0 模的传播常数 β 为 9.78 和 9.772, 模有效折射率 N_{eff} 为 2.382 和 2.384; 脊形波导中 TE0 模的传播常数为 10.199 和 10.301, 模有效折射率为 2.486 和 2.511。结果表明, 条形波导计算偏差约 -0.08%; 脊形波导偏差约 1.01%; 高阶准偏振模式的计算结果类似。其中, $N_{\text{eff}} = \beta/k_0$, 光波工作波长 1550nm, 单条形波导芯层截面 450nm × 220nm, 脊形波导芯层截面 450nm × 130nm, Si 过渡层厚度 90nm。过渡层的引入缓解了芯层与包覆层的折射率突变效应, 可有效避免因界面不规则引起的散射损耗, 但过渡层的厚度设置也要考虑模斑的约束, 通过优化获得该结构下比较合适的厚度。

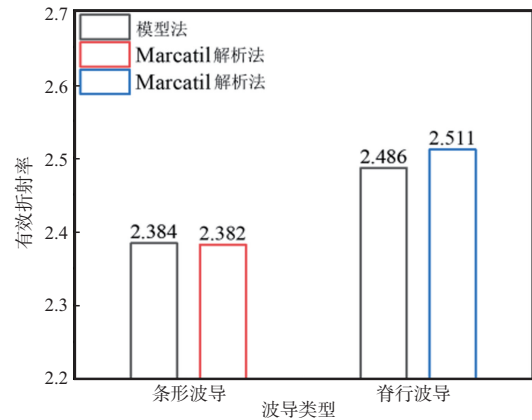


图4 矩形波导中 TE0 模有效折射率求解结果

图 5 (a) 和 5 (b) 分别给出单条形和脊形两种波导结构分别采用解析法和建模法获得 TE0~TE3 模式有效折射率随波导芯层宽度的变化曲线。光波导的工作波长均为 1550nm。对比结果可知: 对于条形类芯层结构单一的波导, 解析法在不同阶次的偏振模式计算都保持很高的精度; 对于脊形类芯层等更为复杂的波导结构, 解析法在远离截止的低阶模式计算上仍然保持较高的计算精度。另外, 随着波导宽度增加, 模式可分布

的区域增大，同阶模式的有效折射率增大且损耗下降，表明宽波导束缚模式的能力更强，反之亦然。模有效折射率直观反映了波导中的模式数量和能量约束能力，即远离模式截止状态和低阶次模式下的导模有更高的模场有效厚度和能量约束比，方便用于指导平面波导器件的设计。

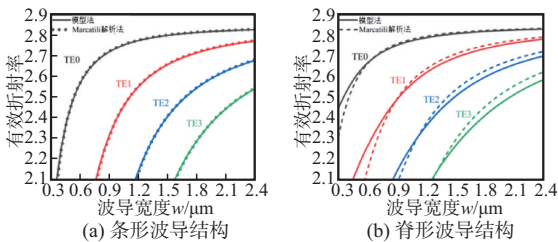


图5 不同偏振模有效折射率随波导芯层宽度的变化曲线

3 波导色散与相变光开关设计

波导本征损耗与模式和物理结构密切相关，远离模式截止的宽度或厚度具有越低的模式传输损耗，但是物理尺度的增加容易激发更高阶模式，对基模或少模传输的平面集成光路器件不利。进一步对条形和脊形波导中激发的多阶次TE模和TM模有效折射率和传输损耗随波导宽度变化进行建模分析，获得不同模式的截止宽度及其低损耗传输宽度范围。两类波导中TE0~TE3模和TM0~TM3模有效折射率与传输损耗曲线，如图6所示。平面集成光路器件中波导的长度一般约为数十微米~数百微米，以光经过100μm米长度的波导传输后，能量损耗小于万分之一，即传输损耗10⁻⁴dB/100μm为模式低传输损耗截止值，计算图6(a)~(d)中各模式的低损传输宽度范围。考虑不激发更高阶模式情况下，获得矩形波导的最佳物理尺寸，指导设计；两种矩形波导中的各阶次偏振模的截止宽度和获得相应低损耗传输的宽度范围，如表1和表2所示。

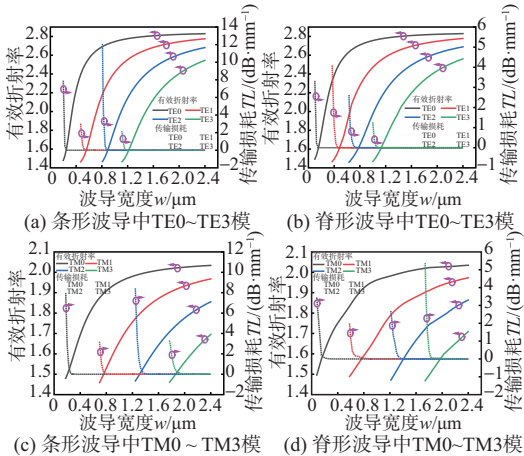


图6 波导色散关系与传输损耗

表1 单条形波导中不同阶次TE和TM模式截止特性

模式	截止宽度/nm	低损传输宽度范围/nm
TE0	201	278~470
TE1	471	576~808
TE2	809	936~1111
TE3	1112	—
TM0	178	435~695
TM1	696	989~1244
TM2	1245	1553~1768
TM3	1769	—

表2 脊形波导中不同阶次TE和TM模式截止特性

模式	截止宽度/nm	低损传输宽度范围/nm
TE0	100	185~369
TE1	370	531~630
TE2	631	816~999
TE3	1000	—
TM0	128	357~580
TM1	581	968~1214
TM2	1215	1503~1739
TM3	1740	—

由表可知，光波模式在脊形波导里有更大的分布区域，模式截止宽度更小，模式更易激发，这是由于过渡层的存在对模式分布的贡献。因此在波导宽度相同情况下，同种模式在脊形波导结构中有更大的模有效折射率和更低的传输损耗。

以脊形波导为例，波导芯层截面0.13μm×2.4μm，经过100μm传输后，TE0~TE3模的传输损耗分别为3×10⁻¹⁵dB、9×10⁻¹⁴dB、5×10⁻¹⁴dB和9×10⁻¹³dB；TM0~TM3模的传输损耗分别为2×10⁻⁸dB、8×10⁻⁶dB、4×10⁻⁵dB和2×10⁻⁵dB。相同宽度下，同阶次的TE偏振模的传输损耗明显优于TM偏振模。图7分别给出利用FDE建模获得的脊形波导中各阶导模的横场分布E_{mn}^x和E_{mn}^y。其中，图7(a)~(d)为准TE0~TE3模式的模场分布，对应E₁₁^x、E₁₂^x、E₁₃^x和E₁₄^x；图7(e)~(h)为准TM0~TM3模式的模场分布，对应E₁₁^y、E₁₂^y、E₁₃^y和E₁₄^y。

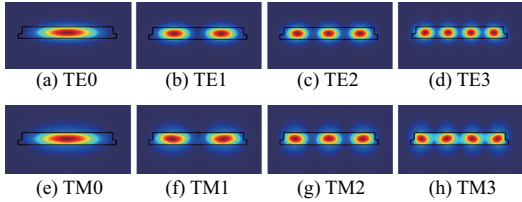


图7 脊形波导中不同偏振模式的模场分布图

光波导作为平面集成光路器件的基本单元，可以有机的集成在同一块衬底上构成既有光源又有检测器，并且将光频调制、滤波和复用/解复用等完整的光学功能集于一体的芯片化器件。基于硫化物相变薄膜的光波导开关器件，将材料的优

异光学特性与波导结构相结合,成为平面光路器件的一大研究热点,有效解决器件的集成度、热容量、损耗及功耗等问题^[4,9-10,26]。图8(a)~(c)给出一种脊形波导结构与硫化物薄膜锗锑硒碲(Ge₂Sb₂Se₄Te₁, GSST)集成的相变型1×1光波导开关结构示意图。其中,GSST薄膜紧贴芯层顶端放置,与芯层同宽,均为360nm,处于基模的低损耗宽度范围,长度为2μm,光波长1550nm下,该薄膜非晶态和晶态的折射率分别为:3.38+0.02i和5.13+0.41i^[27]。通过GSST薄膜晶态的高吸收率和非晶的高透过率实现光路通断。

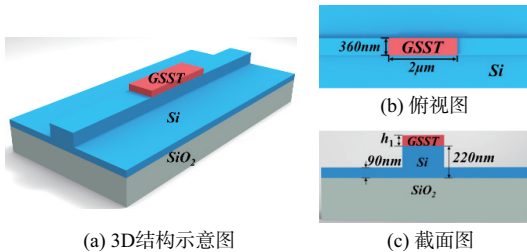


图8 基于脊形波导的相变型1×1光开关

损耗与通断效率是光开关的重要性能,对光开关单元的插入损耗($IL = -10 \times \lg(T_o/T_i)$)和消光比($ER = IL_c - IL_a$)特性进行分析。其中, T_i 和 T_o 分别是光开关输入和输出的功率, IL_c 和 IL_a 分别是晶态下和非晶态下光开关的插入损耗。

对相变型光波导开关进行建模设计与优化,结果如图9所示。由图9(a)可知,随着相变薄膜的厚度增加,TE0模的晶态插入损耗呈现先增大后减小的趋势,非晶态插入损耗变化平缓,且 $h_1=72\text{nm}$ 时,晶态插入损耗有最大值17.35dB,同时获得消光比最大值17.33dB。在工作波长为1520~1580nm范围内,TE0和TM0两种模式下,非晶态插入损耗均小于0.07dB,晶态插入损耗均高于15dB,如图9(b)所示。选取GSST薄膜厚度分别为70nm、72nm和74nm时,观察TE0和TM0模式传输,插入损耗、消光比与工作波长的相关性。对TE0模, $h_1=74\text{nm}$ 时,消光比表现出平坦趋势,最值差距为0.67dB; $h_1=72\text{nm}$ 时,1550nm处消光比取得最大值17.33dB; $h_1=70\text{nm}$ 时,消光比在长波方向表现较好,如图9(c)所示。对TM0模,消 $h_1=74\text{nm}$ 时,消光比也表现出平坦趋势,最值差距为0.59dB; $h_1=72\text{nm}$ 时,1550nm处消光比取得最大值17.31dB; $h_1=70\text{nm}$ 时,消光比在短波方向表现较好,如图9(d)所示。在整个波段内,TE0模消光比为15.73~17.70dB, TM0模消光比为15.78~17.65dB,光开关显示了良好的低损耗传输与偏振不敏感特性。图10(a)~(d)

分别给出TE0和TM0模传输时,相变光开关在通或断状态下波导中的功率场分布,右侧色条表示波导中传输功率归一化值。其中工作波长1550nm,GSST相变薄膜厚度72nm;当光开关断开时,GSST薄膜处于晶态;当光开关接通时,GSST薄膜处于非晶态。

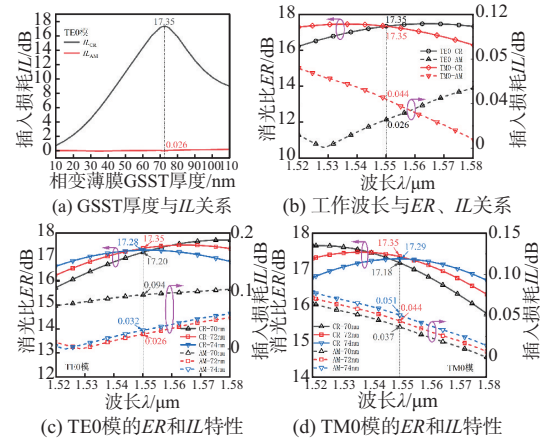


图9 相变型1×1光开关优化设计结果

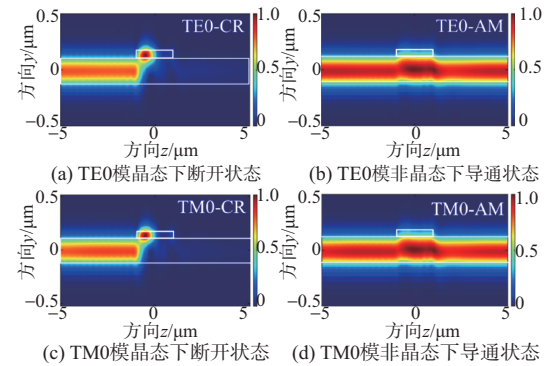


图10 光开关在通/断状态下的功率分布图

4 结论

本文采用了Marcatili解析法和基于有限差分法的建模法对两种矩形波导色散关系进行讨论,并针对片上波导器件的传输损耗问题进行波导宽度优化。结果表明,解析法物理含义清晰,处理条形类结构单一的波导色散时,具有很高的精度;对于相对复杂的脊波导结构,解析法在远离截止的低阶模计算中仍保持较高的计算精度。波导尺寸相同情况下,同种模式在脊形波导中有更大的有效折射率和更低的传输损耗。并以一种基于脊形波导的相变型光开关结构为例,进行单元器件优化设计,在工作波长1520~1580nm范围内,光开关插入损耗均小于0.07dB,TE0和TM0偏振模传输下的消光比分别为15.73~17.70dB和15.78~17.65dB,光开关具有良好的偏振不敏感性和消光比平坦性。本研究为求解光波导色散特性及光开关等平面集成光路器件设计和性能优化提供可靠依据。

参考文献:

- [1] Jahani S, Jacob Z. All-dielectric metamaterials[J]. *Nature Nanotechnology*, 2016, 11(1):23—36.
- [2] Cheben P, Halir R, Schmid J H, et al. Subwavelength integrated photonics [J]. *Nature*, 2018, 560(7720):565—572.
- [3] Marpaung D, Yao J, Capmany J. Integrated microwave photonics[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(2):80—90.
- [4] Bogaerts W, Pérez D, Capmany J, et al. Programmable photonic circuits[J]. *Nature*, 2020, 586(7828):207—216.
- [5] Liu J, Huang G, Wang R N, et al. High-yield, wafer-scale fabrication of ultralow-loss, dispersion-engineered silicon nitride photonic circuits[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1):2236.
- [6] Shastri B J, Tait A N, Ferreira de Lima T, et al. Photonics for artificial intelligence and neuromorphic computing[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(2):102—114.
- [7] Feldmann J, Youngblood N, Karpov M, et al. Parallel convolutional processing using an integrated photonic tensor core[J]. *Nature*, 2021, 589(7840):52—58.
- [8] Huan Y, Zhicheng W, Zheng P, et al. Ultra-compact and Non-volatile nanophotonic neural networks[J]. *Advanced Optical Materials*, 2023:2300215.
- [9] Chen X, Xue Y, Sun Y, et al. Neuromorphic photonic memory devices using ultrafast, non-volatile phase-change materials[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(37):2203909.
- [10] Zhou W, Farmakidis N, Feldmann J, et al. Phase-change materials for energy-efficient photonic memory and computing[J]. *MRS Bulletin*, 2022, 47(5):502—510.
- [11] Gostimirovic D, Soref R, Ye W. Resonant bistable 2×2 crossbar switches using dual nanobeams clad with phase-change material[J]. *OSA Continuum*, 2021, 4(4):1316—1325.
- [12] Wu D, Yang X, Wang N, et al. Resonant multilevel optical switching with phase change material GST[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(15):3437—3446.
- [13] 王健, 张宇, 王康睿, 等. 多材料体系三维集成光波导器件(特邀)[J]. *光学学报*, 2023, 44(15):1513002—1.
Wang Jian, Zhang Yu, Wang Kangrui, et al. Three-dimensional integrated optical waveguide devices based on multi-material systems (Invited) [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 44(15):1513002—1.
- [14] Devdutt T, Hrdik S V, Sushil K, et al. Recent developments in Chalcogenide phase change material-based nanophotonics[J]. *Nanotechnology*, 2023, 34:502001.
- [15] Devendra C, Gaurav K. On-chip non-blocking 4×4 and 8×8 photonic switches using MMI-MZI configuration for next-generation data center networks[J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2025, 24:216—223.
- [16] Marcatili E A J. Dielectric rectangular waveguide and directional coupler for integrated optics[J]. *Bell System Technical Journal*, 1969, 48(7):2071—2102.
- [17] Westerveld W J, Leinders S M, Van Dongen K W A, et al. Extension of Marcatili's analytical approach for rectangular silicon optical waveguides[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(14):2388—2401.
- [18] Malekabadi A, Charlebois S A, Deslandes, et al. High-resistivity silicon dielectric ribbon waveguide for single-mode low-loss propagation at F/G-bands[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2014, 4(4):447—453.
- [19] Khosrovani-Moghaddam M A, Shishegar A A. Spoof surface plasmon analysis based on Marcatili's method[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2020, 37(11):3261.
- [20] Ramadan T A. Analytical solutions for the guided modes of rectangular silicon optical waveguides: a plane-wave approach [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2024, 56(4):524.
- [21] Zhang Y, Zhang Q, Rios C, et al. Transient tap couplers for wafer-level photonic testing based on optical phase change materials[J]. *ACS Photonics*, 2021, 8:1903—1908.
- [22] 查正桃, 张谦述, 温倩. 一维渐变介电张量液晶光波导的模式解[J]. *光学技术*, 2022, 48(4):410—415.
Zha Zhengtao, Zhang Qianshu, Wen qian. Modesolver for liquid crystal optical waveguide with one-dimensional graded dielectric tensor [J]. *Optical Technique*, 2022, 48(4):410—415.
- [23] Wu C, Yu H, Lee S, et al. Programmable phase-change metasurfaces on waveguides for multimode photonic convolutional neural network[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1):96.
- [24] Li X, Youngblood N, Cheng Z, et al. Experimental investigation of silicon and silicon nitride platforms for phase-change photonic in-memory computing[J]. *Optica*, 2020, 7(3):218.
- [25] Bierwirth K, Schulz, Arndt F. Finite-difference analysis of rectangular dielectric waveguide structures[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1986, 34(11):1104—1114.
- [26] Sahoo D, Naik R. GSST phase change materials and its utilization in optoelectronic devices: A review[J]. *Materials Research Bulletin*, 2022, 148:111679.
- [27] Wang R, Ji C, Lu L, et al. Enhanced optical contrast of Ag-doped Ge-Sb-Se-Te phase change films[J]. *Materials Letters*, 2023, 349:134.