

doi:10.3788/gzxb20134212.1464

高折射率差纳米狭缝波导的电场分析

李塘, 王东旭, 钱如一, 程思齐, 顾锐锐, 乐孜纯

(浙江工业大学 理学院, 杭州 310023)

摘要: 狭缝波导在集成光波导器件和系统中有极为广泛的应用, 分析狭缝波导物理过程的理论方法和理论模型对指导该类器件和系统的设计至关重要. 本文通过分析狭缝波导的物理机理和模式特性, 提出将狭缝波导五层对称结构中的波导和狭缝区域作为一个整体进行分析的理论方法, 并引入导模和辐射模共同作用机制, 在此基础上, 建立了理论模型描述整个狭缝波导结构的电场分布. 将得到的理论结果, 分别与 RSoft 软件仿真结果、其他研究者的理论结果以及实际优化设计结果进行比较研究, 验证了本文理论方法和模型的正确性、优越性、完备性和实用性. 最后, 给出了本文理论模型适用范围的确定方法, 以目前常用狭缝波导(基于 SOI 材料、波导尺寸 $180\text{ nm} \times 300\text{ nm}$)为例, 适用于狭缝宽度小于 96.2 nm 情况. 本文理论模型作为一种补充, 完善了分析光波导性能的耦合模理论体系.

关键词: 集成光学; 狭缝波导; 辐射模; 亥姆霍兹方程; 高折射率差

中图分类号: O431.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)12-1464-9

Electromagnetic Field Analysis of Slot-waveguide with High Refractive Index Difference

LI Tang, WANG Dong-xu, QIAN Ru-yi, CHENG Si-qi, GU Rui-rui, LE Zi-chun

(College of Sciences, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: The slot-waveguide is widely used in the integrated optical waveguide devices and systems. Therefore it is very important to develop a practical theoretical method and model for guiding the design of such devices and systems. By means of analyzing the physical mechanism of the slot-waveguide and the modes transmitted in it, a novel theoretical model was built to describe the electric field distribution in the slot-waveguide. The novel theoretical model was developed based on the conditions of regarding the nano-waveguides and the slot region as a whole system and of introducing both the guided wave and the radiating wave in solving the Helmholtz equation. In order to verify the proposed theoretical model, the theoretical results were compared with RSoft simulation results, a practical optimum design reported by other researchers, and a theoretical method developed by other researchers. The comparison results show that the proposed theoretical model has higher accuracy in describing the slot-waveguides. Finally, the significant condition of the proposed theoretical model was analyzed and determined. Take a typical SOI slot-waveguide with the nano-waveguide size of $180\text{ nm} \times 300\text{ nm}$ as an example, the critical slot width worked out at 96.2 nm .

Key words: Integrated optics; Slot-waveguide; Leaky mode; Helmholtz equation; High refractive index difference

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61172081)、浙江省自然科学基金(No. LZ13F010001)和国家大学生创新创业训练计划(No. 201210337013)资助

第一作者: 李塘(1991-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为集成光学器件. Email: vicky848@163.com

导师(通讯作者): 乐孜纯(1965-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为微结构光电子器件和系统、光纤通信器件和网络技术等. Email: lzc@zjut.edu.cn

收稿日期: 2013-05-20; 录用日期: 2013-07-11

0 引言

2004年,美国康奈尔大学 Michal Lipson 教授研究组首次提出了狭缝波导的概念^[1],并通过理论和实验证实了具有高折射率差的纳米量级光波导结构可将光场限制在低折射率的狭缝中传输.波导结构包括两侧的高折射率波导芯(典型如 Si 材料)和中间的低折射率狭缝介质区(如空气、流体或 SiO₂ 等),狭缝介质区宽度一般小于 100 nm.该波导结构显示出了与传统光波导不同的特性,即可将光能流限制在低折射率狭缝中.基于此特性可以设计新型光学功能性器件,如用于光通信领域的高速响应光开关^[2]、用于光传感领域的高灵敏度生化传感器^[3-6]等,因而受到相关领域研究者的广泛关注.此后,对于狭缝波导的光学特性、制作工艺技术,特别是基于其的功能性器件进行了更加深入的研究.文献[7-11]研究了狭缝波导的光学非线性特性,并通过在波导表面镀金属原子,形成表面等离基元增强效应,提高器件探测灵敏度;文献[10-21]通过改变传输波长、波导结构和形状、波导材料表面特征参量等,优化基于狭缝波导的通信和传感等器件的性能;文献[22]通过对狭缝波导制作工艺的研究,简化制作工艺流程,降低成本.

深入研究狭缝波导的物理机理和分析方法,是设计基于狭缝波导的新型光学功能性器件的基础.对于传统光波导的理论分析,一般采用耦合模理论方法,但对于狭缝波导,耦合模理论并不适用,主要原因有以下两点:1)耦合模理论方程是在波导与包层的折射率差满足缓变条件时推导得出的,不符合狭缝波导中狭缝与波导之间的高折射率差情况;2)耦合模理论主要分析的是波导间距在微米量级时,两光波导之间能量的耦合传递情况,与狭缝波导结构中纳米尺寸的情况不符.因此,需要针对狭缝波导结构提出新的理论模型对其物理现象进行解释.文献[1]中提出的狭缝波导理论模型是对两根波导单独的电场进行叠加得出的,即单独考虑两根波导的电场分布,建立两个 3 层对称模型再进行叠加.然而实际情况中,两个高折射率波导都会对与介质面垂直的 TM 电场分布形成影响,此时两根波导互为彼此的高折射率介质层,因此狭缝波导的模型应为 5 层对称结构,文献[1]的模型理论分析结果与实际存在较大误差.

鉴于此,本文对文献[1]的理论模型和方法进行进一步地修正和优化,以期得出更精确和实用的理论模型和分析方法,指导基于狭缝波导的新型功能性器件的设计和性能分析.从电磁场理论中的亥姆

霍兹方程入手,考虑狭缝波导结构中两根高折射率波导对彼此造成的影响,利用 5 层对称结构,提出了将狭缝波导结构中的高折射率光波导和低折射率狭缝区域作为一个整体进行分析的理论方法,并在引入导模和辐射模共同作用机制的基础上,建立理论模型,描述整个狭缝波导结构的电场分布.进一步地,利用本文理论方法和理论模型所获得的结果,分别与 RSoft 软件的仿真结果、基于文献[1]理论方法所获得的结果以及其他研究者提出的优化设计结果^[23]进行比较研究,验证了本文提出的理论方法和理论模型的正确性、优越性、完备性和实用性.最后,分析得出本文理论模型的适用范围.由于在实际分析中,耦合模理论针对低折射率差波导结构以及两光波导间距在微米量级时更有效,本文理论模型可以作为分析光波导性能的耦合模理论体系的补充,用于各类基于狭缝波导的光学功能性器件和系统的设计和实现.

1 理论方法和理论模型

图 1 为最典型的狭缝波导结构,包括两根平行的直波导和环绕着两根直波导的低折射率介质.定义高折射率的直波导为波导芯区,两根直波导之间的低折射率区为狭缝区域.为了简化模型,利用等效折射率法将其等效为二维波导结构进行处理.如图 1,波导芯的截面尺寸为 180 nm×300 nm,波导芯的折射率为 $n_h = 3.48$,狭缝区的折射率为 $n_s = 1.44$, W_s 代表狭缝宽度.根据电磁场理论,在具有高折射率差的两种介质界面,介电系数 ϵ 不满足缓变条件,并根据电磁场边界条件可知电位移矢量 \mathbf{D} 连续,因此电场强度 E 的变化满足 $E_s/E_h = \epsilon_h/\epsilon_s = n_h^2/n_s^2$.

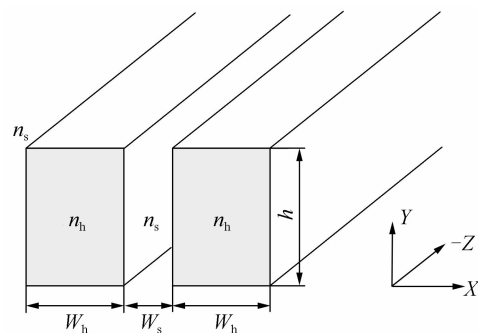


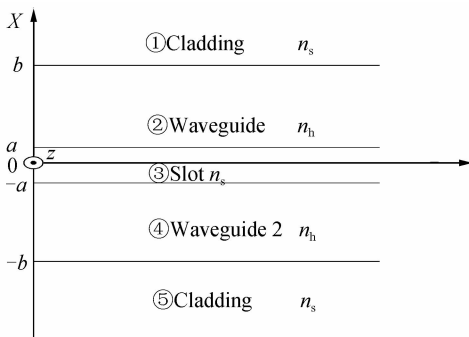
图 1 典型的狭缝波导结构

Fig. 1 Schematic diagram of a typical slot waveguide

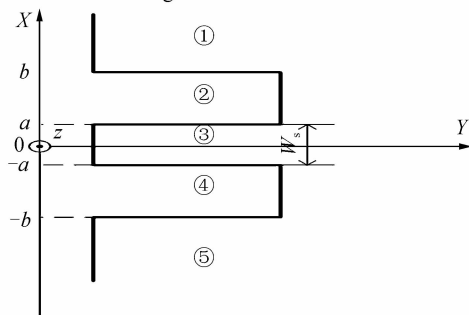
当狭缝宽度为亚微米量级时,从一根波导输入的光能量会耦合进入另一根波导,此时另一根波导成为第一根波导的高折射率限制层,造成空间中能量分布较大幅度的变化.针对该情况,分析波导模式的特征,可知狭缝波导中的传播模式变为“准导模”,即传播常量由原本分立谱值形式展宽成为与之相对

应的一些包含了无限多分立谱值的连续谱^[24]. 这种模式不再是光波导中一般意义上传输的导模,而是同时具有导模和辐射模双重性质的传输模式. 光场分布在逐渐趋向稳定的过程中,除了正常模式的性质,光场还会在此过程中发生辐射,引起波导芯中光功率的大幅度泄漏损耗. 从波导芯中辐射泄漏的光功率汇集在两根波导之间的狭缝区,形成了狭缝波导结构体系中“波导芯/狭缝/波导芯”能量的重新分布,这样的物理特性为设计各种新型结构光子功能器件奠定了基础.

通常在耦合模理论中分析图 1 所示的二波导结构时,是将两根波导分别进行分析的,这样的方法在分析波导尺寸和两波导之间间距尺寸均在微米量级、且满足折射率差缓变的光波导时精确且有效,但分析本文高折射率差纳米狭缝波导则会引入很大偏差. 因此,对于高折射率差纳米狭缝波导结构,理论分析时应将两根波导与狭缝作为一个整体进行考量,同时考虑导模和辐射模并存的模式特征,建立了五层对称模型. 五层对称狭缝波导基本模型及其折射率分布情况如图 2,仍旧以最典型的狭缝波导结构为例. 当光信号从一根波导输入并传播时,将另一根波导看作它的高折射率限制层,这样,就引入了高折射率介质对电场分布的影响(即引入了光场产生辐射模的性质). 根据“准导模”的分析原则,当能量由于辐射效应造成全空间的传播模式变化后,空间



(a) The basic model of a five-layer symmetric slot-waveguide



(b) The profile of its refractive index distribution

图 2 五层对称狭缝波导基本模型及折射率分布
Fig. 2 The model of five-layer symmetric slot-waveguide and the profile of refractive index distribution

中各个区域的电场分布情况也发生了变化. 由于各个区域相对介电常量 $n^2(x)$ 分布不同,首先利用亥姆霍兹方程(针对 TM 模)以及图 2 所示折射率分布模型,写出该模型结构中各个区域的光场,然后通过分析边界条件以及电场稳定后在各个区域的物理性质,推导得出图 1 所示的典型狭缝波导的电场分布公式. 图 2 中波导芯 1 和波导芯 2 的折射率相同,为 $n_h=3.48$;上包层、下包层以及狭缝区的折射率相同,为 $n_s=1.44$.

式(1)为图 2 所示模型结构中各个区域的光场方程

$$\begin{cases} \frac{d^2 E_x(x)}{dx^2} + \gamma_1^2 E_x(x) = 0 & (0 \leq |x| \leq a) \\ \frac{d^2 E_x(x)}{dx^2} + \gamma_2^2 E_x(x) = 0 & (a \leq |x| \leq b) \\ \frac{d^2 E_x(x)}{dx^2} + \gamma_3^2 E_x(x) = 0 & (b \leq |x| < +\infty) \end{cases} \quad (1)$$

各参量间的数值关系为 $k_0 n_s < \beta < k_0 n_h$, $\gamma_j^2 = k_0^2 n_s^2 - \beta^2$ ($j=2$), $\gamma_j^2 = \beta^2 - k_0^2 n_s^2$ ($j=1,3$), β 表示传播常量, k_0 表示真空中的波数.

根据“准导模”的性质,此时的传播模式不仅具有导模性质,也具备了辐射模的性质,由式(1)得到满足物理意义的通解为

$$E_x(x) = \begin{cases} \frac{1}{n_s^2} A_1 \cosh(\gamma_1 |x|) & (|x| \leq a) \\ \frac{1}{n_h^2} A_2 \cos[\gamma_2 (|x| - a)] + \frac{1}{n_h^2} B_2 \sin[\gamma_2 (|x| - a)] & (a < |x| \leq b) \\ \frac{1}{n_s^2} A_3 \exp[-\gamma_3 (|x| - b)] & (|x| > b) \end{cases} \quad (2)$$

式中 A_1, A_2, B_2, A_3 均为常系数,利用电位移矢量 \mathbf{D} 及磁感应矢量 \mathbf{B} 连续的边界条件,有 $\mathbf{D}_1 = \mathbf{D}_2$ 和 $\partial \mathbf{D}_1 / \partial z = \partial \mathbf{D}_2 / \partial z$,即可确定出常系数的表示形式

$$\begin{cases} A_2 = A_1 \cosh(\gamma_1 a) \\ B_2 = \frac{n_h^2 \gamma_1}{n_s^2 \gamma_2} A_1 \sinh(\gamma_1 a) \\ A_3 = A_2 \cos[\gamma_2 (b - a)] + B_2 \sin[\gamma_2 (b - a)] \end{cases}$$

特征方程为

$$\begin{cases} \frac{n_h^2 \gamma_1}{n_s^2 \gamma_2} \tanh(\gamma_1 a) = \frac{B_2}{A_2} \\ \gamma_3 = \frac{n_s^2 \tan[\gamma_2 (b - a)] - \frac{B_2}{A_2}}{n_h^2 \left(1 + \frac{B_2}{A_2} \tan[\gamma_2 (b - a)] \right)} \end{cases}$$

式(2)即为包含两根直波导的高折射率差纳米狭缝波导结构的电场分布,描述了输入光信号在高折射率差纳米狭缝波导结构中传输并形成稳定光场

的理论形式. 该理论形式可以根据实际应用的需要, 进行扩展, 使得该理论模型更具有普适化意义, 如可以被扩展应用于并行的多个高折射率差纳米狭缝波导结构的情况(如图 3), 进一步提升狭缝波导束缚光能量的特性^[23].

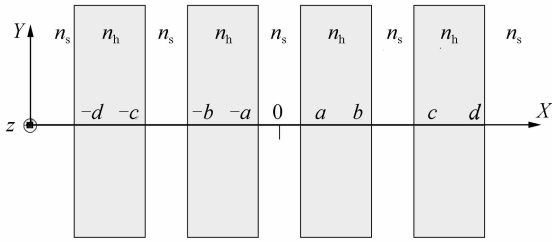


图 3 并行多狭缝波导结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the structure of a parallel multi-slot-waveguide

采用相同的理论分析方法得到并行多狭缝波导的电场方程修正模型为

$$E_x(x) = \begin{cases} \frac{1}{n_s^2} A_1 \cosh(\gamma_1 |x|) & (|x| \leq a) \\ \frac{1}{n_h^2} \{A_2 \cos[\gamma_2 (|x| - a)] + B_2 \sin[\gamma_2 (|x| - a)]\} & (a < |x| \leq b) \\ \frac{1}{n_s^2} A_3 \cosh[\gamma_3 (|x| - b) + \varphi_3] & (b < |x| \leq c) \\ \frac{1}{n_h^2} \{A_4 \cos[\gamma_4 (|x| - c)] + B_4 \sin[\gamma_4 (|x| - c)]\} & (c < |x| \leq d) \\ \frac{1}{n_s^2} A_5 \exp[-\gamma_5 (|x| - d)] & (|x| > d) \end{cases} \quad (3)$$

其中 φ_3 表示相位因子, 解出常系数方程为

$$\begin{cases} A_2 = A_1 \cosh(\gamma_1 a), B_2 = \frac{n_h^2 \gamma_1}{n_s^2 \gamma_2} A_1 \sinh(\gamma_1 a), A_3 = \frac{A_2 \cos[\gamma_2 (b - a)] + B_2 \sinh[\gamma_2 (b - a)]}{\cosh \varphi_3}, \\ A_4 = A_3 \cosh[\gamma_3 (c - b) + \varphi_3], B_4 = \frac{n_h^2 \gamma_3}{n_s^2 \gamma_4} A_3 \sinh[\gamma_3 (c - b) + \varphi_3], A_5 = A_4 \cos[\gamma_4 (d - c)] + B_4 \sin[\gamma_4 (d - c)] \end{cases}$$

特征方程为

$$\begin{cases} \frac{B_2}{A_2} = \frac{n_h^2 \gamma_1}{n_s^2 \gamma_2} A_1 \tanh(\gamma_1 a), \tanh \varphi_3 = \frac{n_s^2 \gamma_2 - \sin[\gamma_2 (b - a)] + (B_2/A_2) \cosh[\gamma_2 (b - a)]}{n_h^2 \gamma_3 \cos[\gamma_2 (b - a)] + (B_2/A_2) \sinh[\gamma_2 (b - a)]} \\ \frac{B_4}{A_4} = \frac{n_h^2 \gamma_3}{n_s^2 \gamma_4} \tanh[\gamma_3 (c - b) + \varphi_3], \frac{n_h^2 \gamma_5}{n_s^2 \gamma_4} = \frac{-\sin[\gamma_4 (d - c)] + (B_4/A_4) \cosh[\gamma_4 (d - c)]}{\cos[\gamma_4 (d - c)] + (B_4/A_4) \sinh[\gamma_4 (d - c)]} \end{cases}$$

各参量间的数值关系为: $k_0 n_s < \beta < k_0 n_h$, $\gamma_j^2 = k_0^2 n_h^2 - \beta^2$ ($j=2, 4$), $\gamma_i^2 = k_0^2 n_s^2 - \beta^2$ ($i=1, 3, 5$).

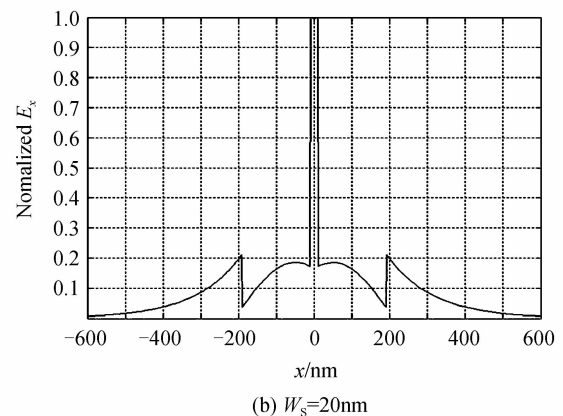
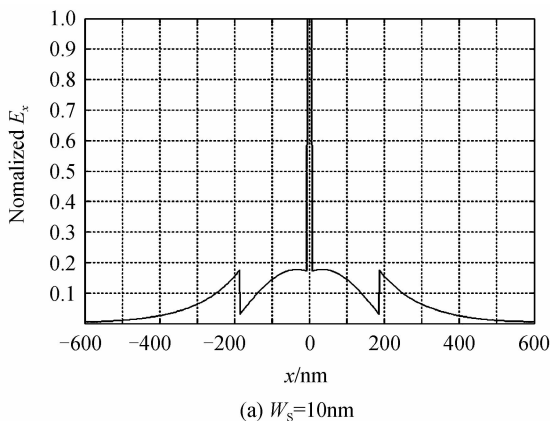
2 结果分析与讨论

将本文的理论方法应用于分析高折射率差纳米狭缝波导中, 所得结果首先与 RSoft 软件的仿真结果进行比较, 以验证本文方法的正确性; 继而与文献[1]中理论方法的结果进行对比, 以验证本文方法的优越性; 最后对采用本文方法得到的并行多狭缝波

导的理论结果, 与其他研究者提出的并行多狭缝波导的实际优化设计结果^[23]进行比较, 以验证本文方法的完备性和实用性.

2.1 与 RSoft 软件仿真结果的分析比较

根据第 1 节建立的理论模型, 针对图 1 所示的高折射率差纳米狭缝波导, 利用 Matlab 仿真得到当狭缝宽度分别为 10 nm、20 nm、50 nm 和 100 nm 时所对应的归一化后电场分布情况, 如图 4.



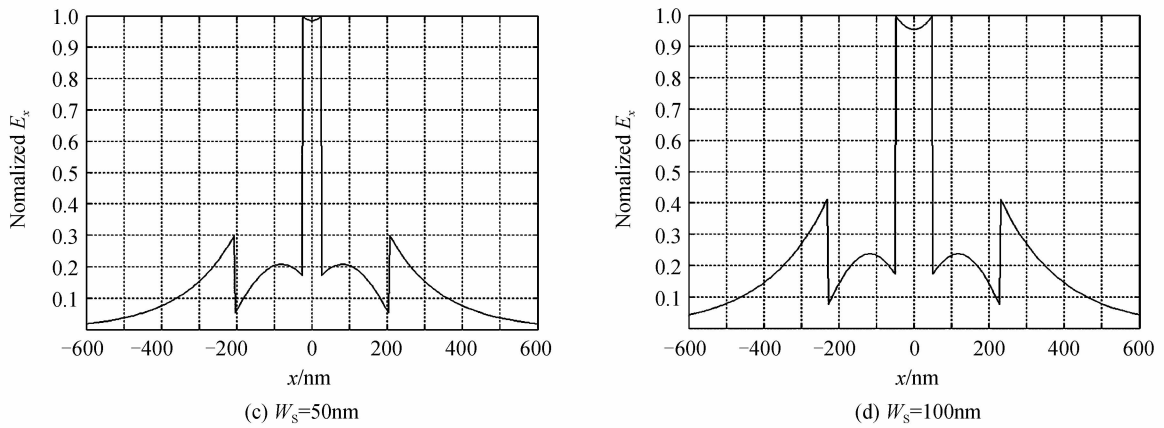


图 4 Matlab 计算所得狭缝波导归一化电场分布图

Fig. 4 The normalized electric field distribution based on the proposed theoretical method and Matlab calculations

利用 RSoft 软件对相同结构和条件的高折射率差纳米狭缝波导进行仿真,结果如图 5. 将图 4 与图 5 进行比较,可知本文理论所得的电场分布规律与

Rsoft 模拟所得的电场分布规律相同,即用本文提出的理论方法和理论模型分析高折射率差纳米狭缝波导的电场分布是可行和有效的.

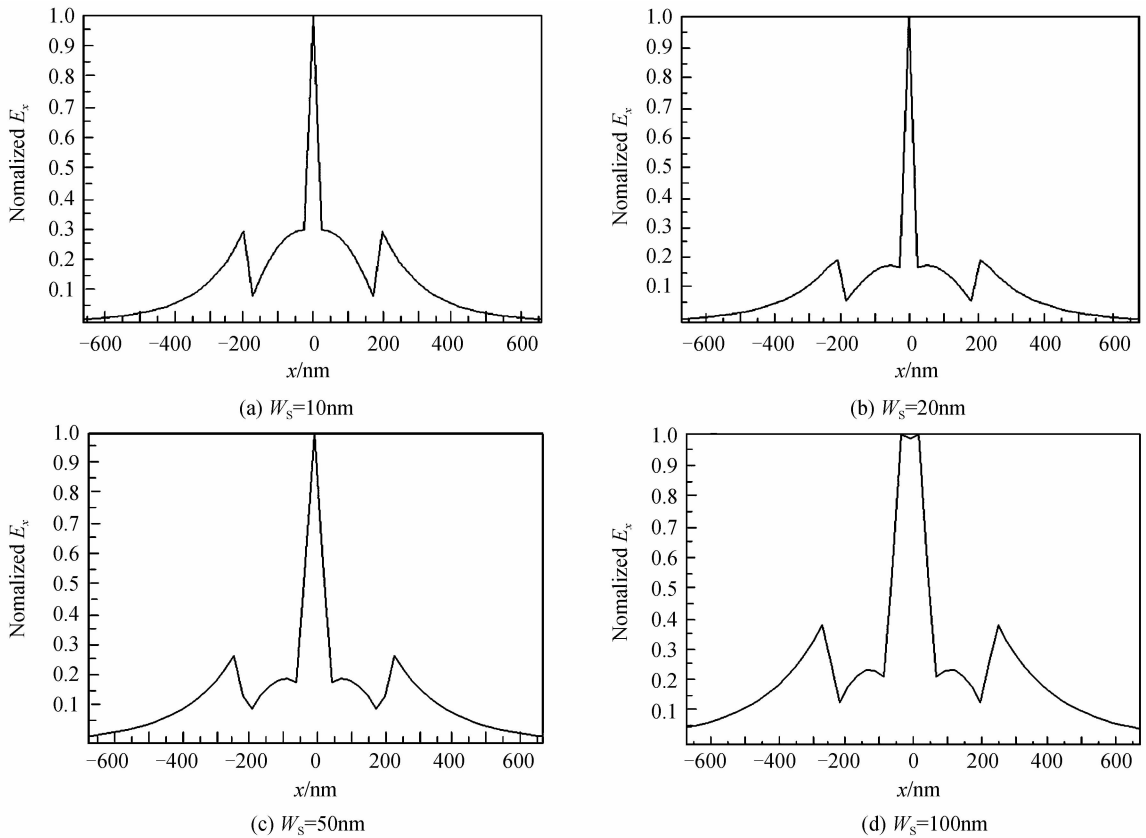


图 5 RSoft 软件模拟所得狭缝波导归一化电场分布图

Fig. 5 The normalized electric field distribution based on RSoft simulations

2.2 与文献[1]理论方法和模型的分析比较

在狭缝波导的研究中,大多侧重器件设计,极少对狭缝波导结构的电场分布进行理论研究,只有文献[1]在提出狭缝波导概念时,对其电场分布进行过比较详细的分析,因此本文与已有理论方法和模型的分析比较针对文献[1]进行,进一步论证本文所提出的理论方法和理论模型的优越性.

采用 Matlab 对文献[1]的理论结果进行仿真,

得到狭缝宽度分别为 10 nm、20 nm、50 nm 和 100 nm 时的归一化电场分布图,如图 6. 比较图 6 和图 5 可知,当狭缝宽度小于 50 nm 时,文献[1]给出的理论结果所描述的场分布与 RSoft 软件模拟所得的场分布出现明显不吻合的现象,且狭缝宽度越小,差距越大. 进一步地,根据文献[1]的理论结果,计算了狭缝内与波导芯内能量密度的比值随狭缝宽度的变化(如图 7),发现其变化趋势呈单调上升. 根据狭缝波

导约束光能量的物理本质,当狭缝尺寸越小时,其束缚场的能力越强,且在狭缝宽度逐渐减小的过程中,狭缝中的能量密度会比波导芯中的能量密度变化更快,即狭缝中与波导芯中的能量密度比值随着狭缝

宽度不断增大而减小.然而图 7 却显示,随着狭缝尺寸的增大,该比值会不断增大,这显然与狭缝波导约束光能量的物理本质不相符.

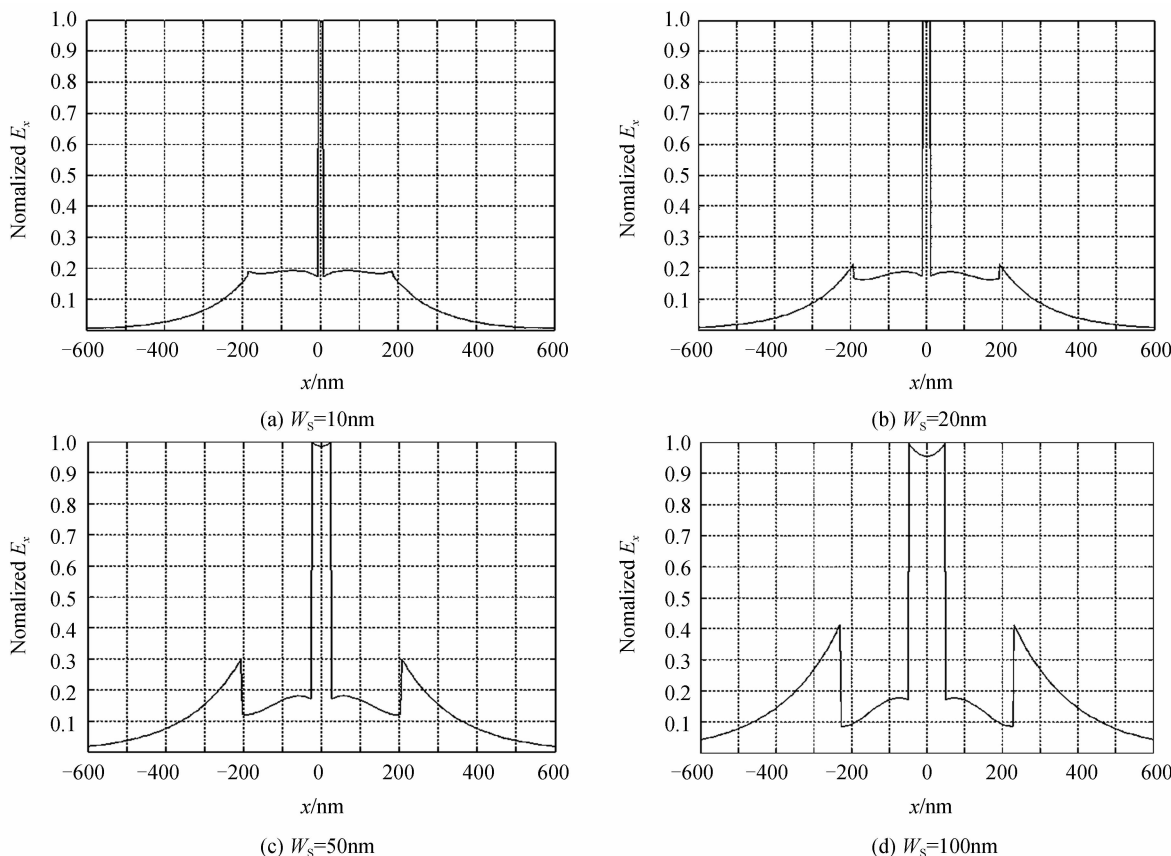


图 6 文献[1]的理论结果所得的相同条件的归一化电场分布图

Fig. 6 The normalized electric field distribution based on the theoretical results of Ref. [1]

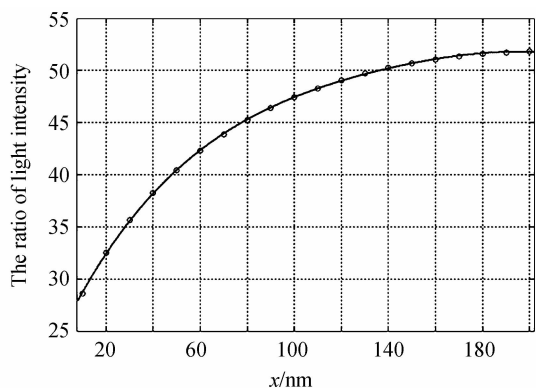


图 7 文献[1]的理论模型,计算得出的狭缝中与波导芯中功率密度之比随狭缝宽度的变化

Fig. 7 The ratio of light intensity within the slot and the waveguide varies with the size of slot, on the basis of the theoretical results of Ref. [1]

究其原因,这与文献[1]所提出的狭缝波导理论模型不合理有关.由于狭缝波导中不同介质区域折射率突变导致电场发生跳变,其传播模式性质也发

生改变,造成能量在除狭缝外的低折射率区域(如上包层和下包层)光场呈指数衰减形式,而在狭缝区域呈现辐射模特性.由于狭缝宽度仅为纳米量级,致使光能量不仅辐射进入了狭缝区域,同时也进入了另一波导芯内,使得两根波导之间的相互作用更强也更复杂.因此,再采用文献[1]中将两根波导分别进行考虑的分析模式就会产生相当大的误差.本文将两根波导及其狭缝区域作为一个整体,并考虑兼具导模和辐射模的模式特性,建立理论模型,得出的理论结果(图 4)与 RSoft 软件的仿真结果(图 5)基本吻合.同时,本文也在相同参量和条件下,利用本文所建立的理论模型计算了狭缝中与波导芯中功率密度比值随狭缝宽度的变化,结果如图 8,其所示变化趋势与狭缝波导约束光能量的物理本质相吻合,因此适合用于指导基于狭缝波导的功能性器件的设计和优化.

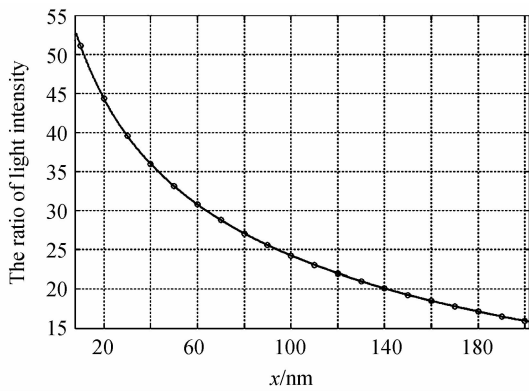


图 8 根据本文理论模型所得狭缝中与波导芯中功率密度之比随狭缝宽度的变化

Fig. 8 The ratio of light intensity within the slot and the waveguide varies with the size of slot based on proposed theoretical method

2.3 与基于狭缝波导的功能性器件的实际设计结果的分析比较

有研究报道显示,并行的多狭缝波导结构具有更强的束缚光能量的能力^[23].本文的理论模型不仅适用于单狭缝波导,模型扩展后还可用于分析多狭缝波导结构,多狭缝波导的电场方程修正模型如式(3)所示.

为了进一步验证本文所建立理论模型的完备性与实用性,将本文的理论方法和理论模型应用于实际设计案例,选取已经经过其他研究者论证的设计方案作为参照.针对文献[23]中实际设计的并行多狭缝波导结构,采用相同的结构和参量(即 $t_H = 60$ nm, $t_l = 10$ nm, $t_c = 160$ nm, $n_0 = 1.50$, $n_l = 1.46$ 和 $n_H = 3.50$),对应本文理论模型,有 $|b-a| = t_H$, $|c-b| = 2a = t_l$, $|d-c| = t_c$, 以及 $n_h = n_H = 3.50$, $n_s = n_l = n_0 = 1.46$. 用本文提出的理论方法进行计算,得到并行多狭缝波导结构的归一化电场分布图,如图 9.

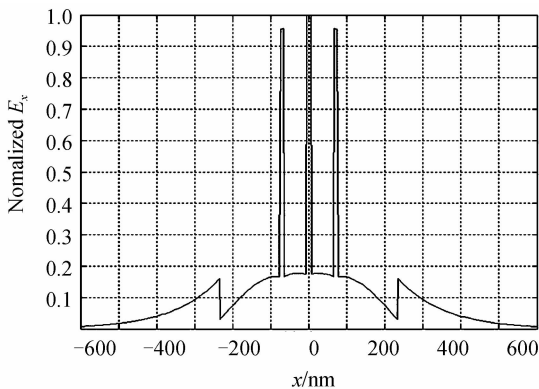


图 9 采用本文理论方法计算得出的并行多狭缝波导结构的归一化电场分布

Fig. 9 The normalized electric field distribution for the parallel multi- slot-waveguide structure based on our theoretical method

由图 9 可知,当中间的两层高折射率介质的宽度足够窄时,会使得 3 个并行狭缝中的功率接近相等,且对光功率的约束能力比单狭缝结构更强.将图 9 与文献[23]中的设计结果(图 10)进行比较可知,采用本文提出的理论模型所得到的理论结果与文献[23]的优化设计结果能够较好地吻合,进一步验证了本文提出的理论方法和理论模型的可靠性,且设计过程简单,不需要复杂的优化过程,具有很好的实用性.

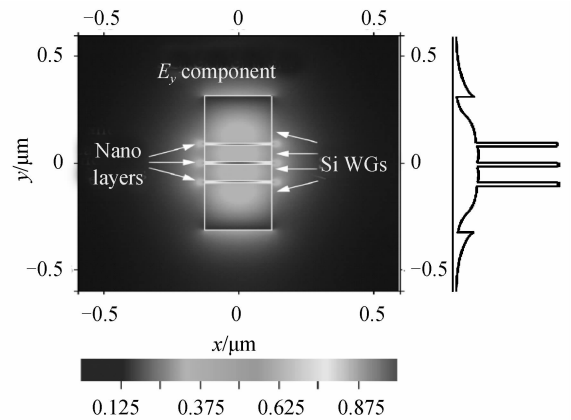


图 10 并行多狭缝波导结构的电场分布^[23]

Fig. 10 The normalized electric field distribution of parallel multi- slot-waveguide structure^[23]

3 理论方法和模型的适用范围

前文已经述及,对于高折射率差纳米狭缝波导结构,本文将两根波导与狭缝作为整体,同时考虑导模和辐射模并存的模式特征,分析整个狭缝波导中的电场分布,进而得出全空间的能量分布.要确定理论模型的适用范围,需要分析狭缝以及波导芯中功率和功率密度随狭缝宽度变化表现出的性质.因为随着狭缝宽度的变化,整个波导体系中各区域的能量分布、功率和功率密度的变化是描述狭缝波导最核心的物理量.当狭缝宽度到达某一临界值,且其进一步增大对整个波导体系能量分布影响很小时,则说明了理论模型在此数值后已不再能很好地描述光场分布,进而得出该理论的适用范围.

基于此,利用“准导模”在狭缝区域的辐射模性质,讨论在狭缝宽度逐渐增大的过程中,狭缝中束缚的能量与全空间能量比值的变化趋势,并以此论证本文理论模型的适用范围.这里狭缝中能量通过对狭缝宽度内的光能流密度进行积分获得,而全空间能量则通过对上包层、波导芯 1、狭缝区域、波导芯 2、下包层中的光功率积分并求和获得.根据狭缝波导的物理本质,狭缝能量与全空间能量的比值随着狭缝宽度的增大而增大,但该比值存在极值,即当狭缝宽度增大到一定程度,狭缝能量与全空间能量的

比值收敛于一个最大值,或者在一个临界的最大值之后,该比值会随着狭缝宽度的增大而减小,而狭缝能量与全空间能量比值的最大值即为本文理论模型适用范围的临界位置.在临界位置之前,波导满足狭缝波导条件,可应用本文理论方法和理论模型进行分析,而在临界位置之后,波导可当作普通的光波导,利用耦合模理论进行分析.图 11 给出了狭缝能量与全空间能量比值随狭缝宽度的变化曲线,计算参量如下:高折射率介质区域 $n_h = 3.48$,低折射率介质区域 $n_s = 1.46$,波导芯的截面尺寸 $W_h \times h = 180 \text{ nm} \times 300 \text{ nm}$.

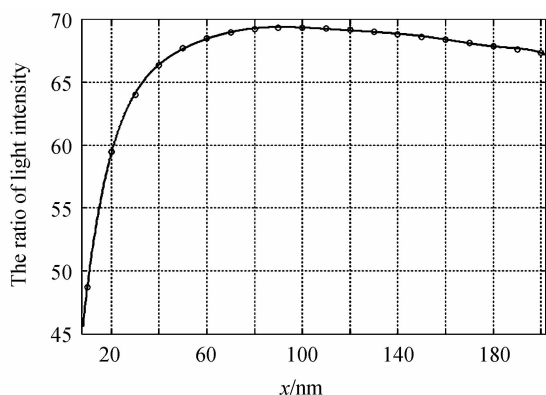


图 11 狭缝能量与全空间能量比值随狭缝宽度的变化曲线
Fig. 11 The ratio of the energy within the slot and the whole space varies with the slot width

从图11中可以看出,当狭缝宽度 $W_s = 96.2 \text{ nm}$ 时,狭缝能量与全空间能量之比达到最大值, $W_s = 96.2 \text{ nm}$ 可作为狭缝波导中传播模式是否存在辐射波特性的分界线,也是狭缝中的能量分布比较均匀的分界.因此,当狭缝宽度在 $0 < W_s < 96.2 \text{ nm}$ 范围内时,可以依据“准导模”原理解释狭缝(低折射率区域)束缚光能量的现象,且此时狭缝中的能量约束性很强,能够基本保证狭缝中的能量分布均匀,即高折射率介质边界处的能量与狭缝中间的能量基本相等;而当狭缝宽度 $W_s > 96.2 \text{ nm}$ 时,“准导模”特征可忽略,需依据耦合模理论描述光波导的性能,此时随着狭缝宽度的增大,狭缝的能量约束能力减弱,狭缝中的光场强度越来越不均匀,出现了靠近高折射率介质边界处很高,中间很低的情况.此时可预测,由于高折射率差的电场跳变现象主要发生在折射率边界位置,因此已不再能很好地将光能量束缚于低折射率狭缝的中心.可见,本文的理论模型可以作为一种补充纳入光波导的耦合模分析理论体系,对高折射率差纳米狭缝波导情况,给出更准确的物理解释和性能描述.另一方面,从上面的分析还可以看出,狭缝能量与全空间能量之比出现临界值的位置会随着狭缝波导的相对折射率差、波导尺寸等因素动态变化,因此也是设计基于狭缝波导的功能性器

件或者分析器件性能变化必须考虑的因素.

4 结论

本文通过分析狭缝波导的物理机理和模式特性,建立了一种新的狭缝波导理论分析模型,更准确地描述了整个狭缝波导结构的电场分布情况,并对此理论模型进行普适化拓展,建立了并行多狭缝波导的理论分析模型.采用本文理论模型得到的结果,分别与 RSoft 软件仿真结果、其他研究者的理论结果以及实际优化设计结果进行了比较研究,进一步验证了本文理论模型的正确性、优越性、完备性和实用性.最后,通过分析狭缝波导体系统中的能量分布情况,得出本文理论模型的适用范围.以目前基于 SOI 材料、波导尺寸为 $180 \text{ nm} \times 300 \text{ nm}$ 的单狭缝波导为例,适用于狭缝宽度小于 96.2 nm 的情况.当狭缝宽度大于 96.2 nm 时,可利用折射率非缓变条件下修正的耦合模理论进行分析.本文理论方法作为一种补充,完善了分析光波导性能的耦合模理论体系,对基于狭缝波导的集成光学器件的设计和 optimization 具有指导意义.

参考文献

- [1] ALMEIDA V R, XU Q, BARRIONS C A, *et al.* Guiding and confining light in void nanostructure[J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(11): 1209-1211.
- [2] XIAO S, LI Y, HAO Y, *et al.* High-speed compact silicon digital optical switch with slot structure[J]. *Optik*, 2011, **122**: 955-959.
- [3] KARGAR A, GUO H. Optical surface sensing by bent slot waveguides[C]. 2010 Proceedings of the 2010 5th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, Xiamen, China, January 20-23, 2010: 307-308.
- [4] KARGAR A, CHAO C. Design and optimization of waveguide sensitivity in slot microring sensors [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2011, **28**(4): 596-603.
- [5] CLAES T, MOLERA JG, DE VOS K, *et al.* Label-free biosensing with a slot-waveguide-based ring resonator in silicon on insulator[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2009, **1**(3): 197-204.
- [6] KARGAR A, LEE C. Optical sensing by multiple-slot waveguide microring resonators [C]. 2009 9th IEEE Conference on Nanotechnology, Genoa, Italy, July 26-30, 2009: 240-242.
- [7] TIAN H, ZHANG X, YANG D, *et al.* Research on the dispersion compensation of slot photonic crystal waveguide[J]. *IEEE Photonic Technology Letters*, 2011, **23**(17): 1222-1224.
- [8] SHIN J S, KWON M S, SHI S Y. Design and analysis of a vertical directional coupler between a three-dimensional plasmonic slot waveguide and a silicon waveguide[J]. *Optics Communication*, 2011, **284**(14): 3522-3527.
- [9] JASKORZYNSKA B, SONG Y, ZHU N, *et al.* Dielectric and plasmon slot waveguides for photonic integration[C]. 2009 11th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2009), Ponta Delgada, Azores, Jun 28-

- Jul 02, 2009: 1-4.
- [10] DAI D, HE S. Low-index-material-based nano-slot waveguide with quasi-Bragg-reflector buffer[J]. *Electronics Letters*, 2008, **44**(23): 1354-1356.
- [11] LUO Z, YUAN X, MAN D, *et al.* Mapping the modal effective area in submicrometer strip and slot waveguides[C]. 2011 International Conference on Electronics and Optoelectronics, Dalian, China, July 29-31, 2011; V2-325-327.
- [12] DING R, BAEHR-JONES T, KIM WJ. Low-loss asymmetric strip-loaded slot waveguides in silicon-on-insulator[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, **98**: 233303-1-3.
- [13] MA Y, HUANG D. A Compact slot waveguide directional coupler-based silicon-on-insulator polarization splitter [C]. 2008 5th IEEE International Conference on Group IV Photonics, Sorrento, Italy, Sept 17-19, 2008; 297-298.
- [14] MU J, ZHANG H, HUANG W. A theoretical investigation of slot waveguide Bragg gratings [J]. *IEEE Journal Quantum Electronics*, 2008, **44**(7): 622-627.
- [15] CHEN A, SUN H, SZEPA A, *et al.* Achieving higher modulation efficiency in electrooptic polymer modulator with slotted silicon waveguide [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, **29**(21): 3310-3317.
- [16] SANCHI P, JAVIER B, MARTINEZ A, *et al.* Design of silicon-based slot waveguide configurations for optimum nonlinear performance [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, **25**(5): 1298-1305.
- [17] PRTLJAGA N, URRIO D N, MARCONI A, *et al.* Erbium implanted silicon rich oxide thin films suitable for slot waveguides applications [J]. *Optical Materials*, 2011, **33**(7): 1083-1085.
- [18] RYCKMAN J D, WEISS S M. Localized field enhancements in guided and defect modes of a periodic slot waveguide[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2011, **3**(6): 986-995.
- [19] TERVONEN A, KHANNA A, SAYNATJOK A, *et al.* Modeling study of nonreciprocal phase shift in magneto-optic asymmetric slot waveguides [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, **29**(5): 656-660.
- [20] TU X, XU X, CHEN S, *et al.* Simulation demonstration and experimental fabrication of a multiple-slot waveguide [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(5): 333-335.
- [21] CHOI S E, TAE K J, *et al.* Vertical coupling characteristics between hybrid plasmonic slot waveguide and Si waveguide [J]. *Optics Communication*, 2012, **285**(18): 3735-3739.
- [22] TESTA G, BERMINI R. Slot and layer-slot waveguide in the visible spectrum[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, **29**(19): 2979-2984.
- [23] FENG N, MICHEL J, KIMERLING LC. Optical field concentration in low-index waveguides[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2006, **42**(9): 885-890.
- [24] 马春生, 刘式埔. 光波导模式理论[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2007, 274.