

文章编号: 1000-7032(2010)04-0599-06

有限元分析法在 SOI 基微环谐振器设计中的应用

谢 生, 张 彬*, 毛陆虹, 郭维廉, 陈 燕, 于 欣, 张世林

(天津大学 电子信息工程学院, 天津 300072)

摘要: 利用有限元法(FEM)分析了大横截面 SOI(Silicon-on-insulator) 脊型波导的本征模式分布, 确定了脊型波导的单模条件。在保证单模传输的情况下, 模拟了 SOI 微环谐振器中波导耦合器的耦合长度、功率耦合系数与波导尺寸和间距的关系。模拟结果表明: 对于 $W=1\ \mu\text{m}$, $H=2\ \mu\text{m}$ 的 SOI 脊型波导耦合器, 耦合长度 L_c 随波导间距 d 的增加而增大, 功率耦合系数随之减小。在波导间距 $d < 0.8\ \mu\text{m}$ 的情况下, 耦合长度 L_c 随着归一化脊高 r 的增加而增大, 当 $d > 0.8\ \mu\text{m}$ 时, 耦合长度 L_c 随 r 的增加而减小。模拟结果为 SOI 微环谐振器的设计和应用提供了理论依据。

关键词: 集成光学; 微环谐振器; 单模条件; 波导耦合器

中图分类号: TN252; TN256

PACS: 42.82.Et

PACC: 4282

文献标识码: A

1 引 言

由于 SOI 微环谐振器的成本低、结构紧凑、集成度高、插入损耗小、串扰低, 与 CMOS 工艺兼容, 可与其它光电器件实现单片集成, 因而在光学滤波、波分复用、光信号处理等方面得到广泛应用, 并成为集成光电子、光通信、光信息处理等领域的研究热点^[1]。

目前, 已有多篇文献模拟、分析了单环和多环结构的微环谐振器, 但这些方法多数基于传输矩阵法^[2-4], 未能将器件的性能参数与具体的波导结构联系起来, 为微环谐振器的优化设计提供指导。有限元法(FEM)相对于变分有效折射率^[5]等数值方法而言, 具有更高的计算精度和更强的数值稳定性, 能够计算折射率任意分布界面的波导结构, 因而在光波导分析中得到广泛应用。本文采用 FEM 对 SOI 微环谐振器的两个基本理论问题: SOI 脊型波导的单模条件和微环谐振器中耦合系数与波导结构的关系进行了模拟分析, 计算结果为 SOI 基微环谐振器的设计和应用提供了理论依据。

2 理论分析

有限元分析法的基本思想是将分析区域划分

成若干个小区域, 把每个小区域内的连续场变量近似地用多项式构成的形状函数表示。由于有限单元内自由变量的个数是有限的, 因此, 整个分析区域内的场分布也由有限个自由变量唯一地确定。

对图 1 所示的脊型波导而言, 若折射率沿纵向均匀分布, 在外边界处满足 Neumann 边界条件, 则波导内的波函数 ϕ 可归结为求 Helmholtz 方程的解^[6]

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + k_0^2(\epsilon_r - n_{\text{eff}}^2)\phi = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0, \quad (2)$$

其中 k_0 为真空波矢, ϵ_r 为介电常数, n_{eff} 为有效折射率, n 是垂直表面的单位矢量。

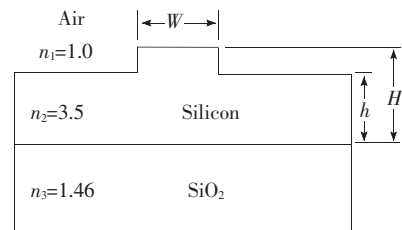


图 1 SOI 脊型波导截面图

Fig. 1 Cross-section of SOI rib waveguide

收稿日期: 2009-09-02; 修订日期: 2009-11-13

基金项目: 国家自然科学基金(60736035); 天津大学青年教师培养基金(TJU-YFF-08B64)资助项目

作者简介: 谢生(1978-), 男, 河北张家口人, 主要从事半导体光电器件及集成技术方面的研究。

E-mail: xie_sheng06@tju.edu.cn

*: 通讯联系人; E-mail: zhangbin5700@sohu.com

将分析区域划分成若干个有限单元后 ϕ_{ei} 有限元 e 的波函数 ϕ_e 可以形状函数 N_{ei} 和波函数 ϕ_{ei} 的形式展开:

$$\phi_e = \sum_{i=1}^{M_e} N_{ei} \phi_{ei} = [N_e]^T \{ \phi_e \}, \quad (3)$$

其中 M_e 是有限元 e 的节点数, T 是矩阵的转置算符。

用 Galerkin 方法, 可由方程 (1) 和 (2) 推导出 TE 模的特征方程^[6]

$$([K] - \beta^2 [M]) \{ \phi \} = \{ 0 \}, \quad (4)$$

其中,

$$[K] = \sum_e \left\{ - \iint \left(\frac{\partial [N_e]}{\partial x} \frac{\partial [N_e]^T}{\partial x} + \frac{\partial [N_e]}{\partial y} \frac{\partial [N_e]^T}{\partial y} \right) dx dy + k_0^2 \epsilon_r \iint [N_e] [N_e]^T dx dy \right\}, \quad (5)$$

$$[M] = \sum_e \iint [N_e] [N_e]^T dx dy, \quad (6)$$

$$\{ \phi \} = \sum_e \{ \phi_e \}, \quad (7)$$

求解上述特征方程, 即可得到 SOI 脊型波导 TE 模的传输常数 β 进而得到相应的模场分布。

3 SOI 脊型波导的单模条件

对于图 1 所示的大截面 SOI 脊型波导, 常用的单模条件表达式为

$$t < r / \sqrt{1 - r^2} + c \quad (r > 0.5), \quad (8)$$

其中 $t = W/H$ 和 $r = h/H$ 分别表示归一化的脊宽和脊高, W 是脊宽, H 是波导芯层厚度, h 是脊高, c 是常数。对于 c 的取值, 不同方法得到的结果各不相同, 其值在 $-0.05 \sim 0.3$ 之间^[7]。在下面的

模拟分析中只考虑 TE 模, 取光波长 $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$, SOI 脊型波导的上包层、芯层和下包层的折射率分别为 1.0、3.5 和 1.46, 波导芯层厚度 $H = 2 \mu\text{m}$ 。

图 2 给出了 $r = 0.8$ $t = 0.6$ 0.8 时, 基模的光场分布。可以看到, 脊宽越宽, 基模在芯层中的横向分布越窄, 场强最大值越接近脊区, 有利于和光纤耦合。然而, 理论模拟表明, 在 $(h/H = 0.8)$ 固定时, 随着 t 的进一步增大, 一阶模逐渐变为导模, 单模条件不再满足。而在 t ($W/H = 1.4$) 固定时, r 越高 (浅刻蚀), SOI 脊型波导的模式分布越接近单模。这是因为刻蚀较浅时, 高阶模泄漏

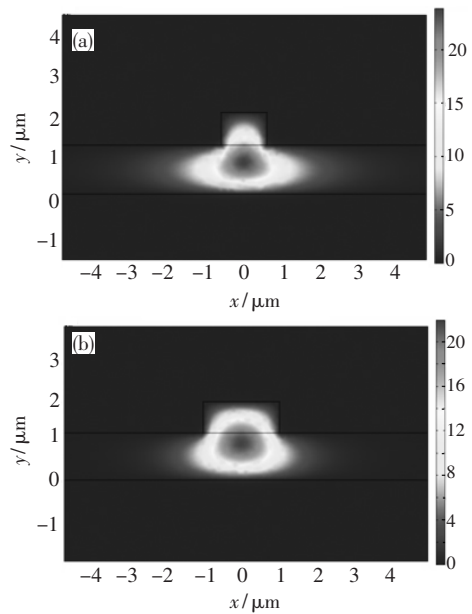


图 2 归一化脊宽 $t = 0.6$ (a) 0.8 (b) 时的基模场分布。
Fig. 2 Fundamental mode profiles with (a) $t = 0.6$, and (b) $t = 0.8$.

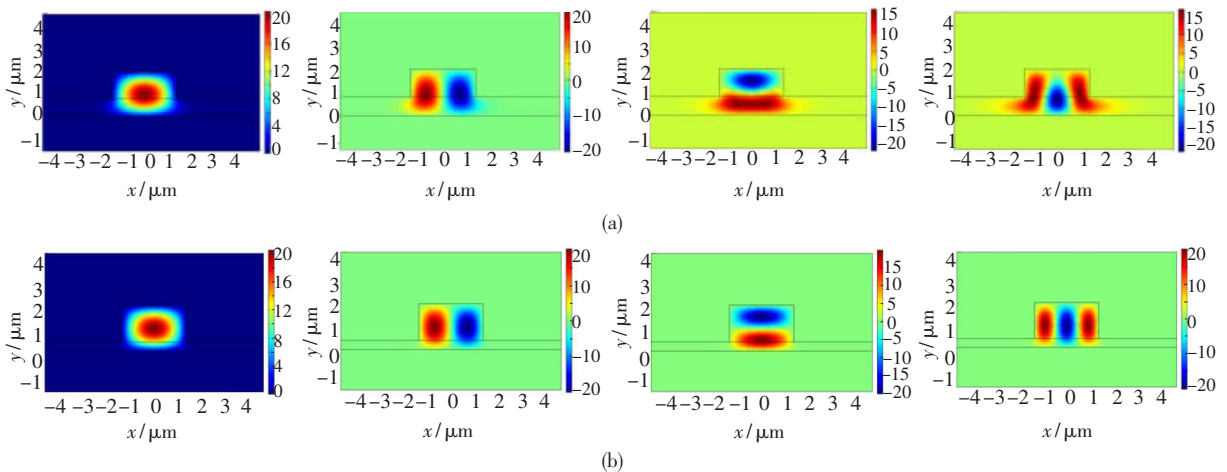


图 3 归一化脊高 $r = 0.4$ (a) 0.2 (b) 时的模场分布。
Fig. 3 Field profiles of SOI rib waveguide with (a) $r = 0.4$, and (b) $r = 0.2$.

到芯层外, 因而只支持基模传输。因此, 大横截面 SOI 脊型波/导的脊宽越窄, 刻蚀越浅, 波导的传输模式越接近单模。

此外, 本文也模拟了 $r < 0.5$ 时, SOI 脊型波导的光场分布, 如图 3 所示。其中 $\mu = 1.4$, 图 3 (a) 和 (b) 的归一化脊高 r 分别为 0.4 和 0.2。从图中可以看到, 当 $r < 0.5$ 时, $\mu = 1.4$ 的 SOI 脊型波导除了支持基模和一阶模外, 还支持高阶模, 并且 r 越小, 脊型波导的模式分布越接近矩形波导。此时, 高阶模不再像 $r > 0.5$ 时那样在芯层中有较长的拖尾分布, 而是更紧密地束缚在脊宽的范围内。

为了确定多模和单模的临界点, 首先固定 SOI 脊型波导的脊高 h , 然后逐渐增大脊宽 W (增量 $\Delta W = 0.2 \mu\text{m}$), 直到出现高阶模为止。多次循环即可得到大截面 SOI 脊型波导的单模条件, 如图 4 所示。为了便于比较, 图中也给出了 Soref 用模式匹配技术得到的单模条件^[8], 即 $c = 0.3$ (点划线表示), 及 Richman 等人^[9, 10] 的实验测试结果。与 Soref 单模条件不同的是, 有限元法计算的

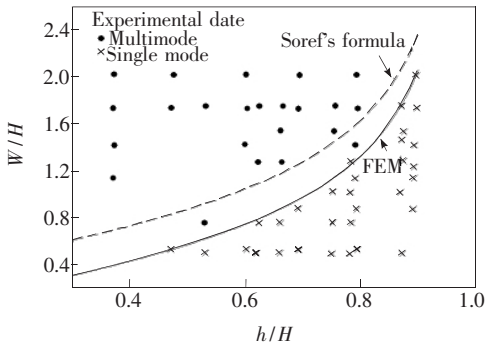


图 4 SOI 波导的单模条件

Fig. 4 Single-mode condition of SOI waveguide

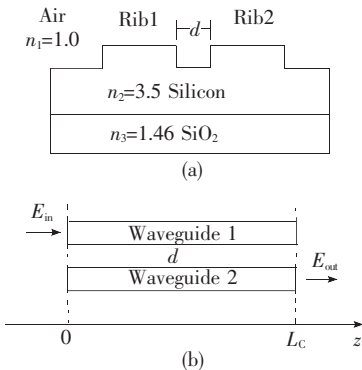


图 5 SOI 脊型波导耦合器示意图

Fig. 5 Schematic of SOI-based rib waveguide coupler

c 值为 0。这与有效折射率法得到的结果完全一致^[10], 与实验结果的拟合参数 $c = -0.05$ 更接近, 这说明有限元法可获得更为严格的单模条件。鉴于多模与单模边界存在一定的模糊性, 采用本文的单模条件更能确保设计波导的单模传输。

4 脊型波导间的耦合

波导耦合器是由相互靠近的光波导构成的基本波导器件, 是微环谐振器的主要组成部分。当两条波导彼此靠近时, 由于隐失场 (Evanescent field) 的耦合效应, 波导 1 中的光能量耦合到波导 2 中, 如图 5 所示。若光在波导 1 中沿 z 向传播距离 L 后, 光能量完全耦合到波导 2 中, 则该传播距离称为耦合长度, 用 L_c 表示。

根据三脊型波导耦合器的理论模型^[11], 双波导耦合器在 $z = L$ 处的电场可表示为两波导最低阶模的线性组合:

$$E(z = L) = O_{TE0} E_{TE0} \exp(-j\beta_{TE0} L) \pm O_{TE1} E_{TE1} \exp(-j\beta_{TE1} L), \quad (9)$$

其中 E_{TE0} 和 E_{TE1} 分别表示偶模和奇模的场函数, β_{TE0} 和 β_{TE1} 是对应的波矢量, O_{TEi} 是 TE_i 模归一化场 $E_{TEi}(x, y)$ 与输入场 $E_{in}(x, y)$ 的交叠积分, 表示为

$$O_{TEi} = \iint E_{TEi}(x, y) E_{in}^*(x, y) dx dy, \quad (10)$$

将输入激励映射到 $z = 0$ 处的最低阶模, 可导出输出功率与输入功率之比^[11]:

$$\frac{P_{out}}{P_{in}}(L) = \text{Re}\{ \iint E(z = L) [E_{TE0} \exp(-j\beta_{TE0} L) \pm E_{TE1} \exp(-j\beta_{TE1} L)] dx dy \} = M_1^2 + M_2^2 \pm 2M_1 M_2 \cos(\beta_{TE0} - \beta_{TE1}) L, \quad (11)$$

其中,

$$M_i = \iint E_{TEi}(x, y) E_{in}^*(x, y) dx dy \cdot \iint E_{TEi}(x, y) E_{out}^*(x, y) dx dy \quad (i = 0, 1), \quad (12)$$

由 (11) 式可导出波导耦合器的耦合长度:

$$L_c = \frac{\pi}{\beta_{TE0} - \beta_{TE1}} = \frac{\lambda_0}{2\Delta n}, \quad (13)$$

其中 Δn 为偶模和奇模的有效折射率差。

根据得到的单模条件和工艺水平, 我们选取 SOI 脊型波导的芯层厚度 $H = 2 \mu\text{m}$, 脊宽 $W = 1 \mu\text{m}$ 。图 6 给出了脊型波导耦合器的最低阶偶模和奇模的光场分布, 其中 $r = 0.6$, $d = 0.4 \mu\text{m}$ 。可

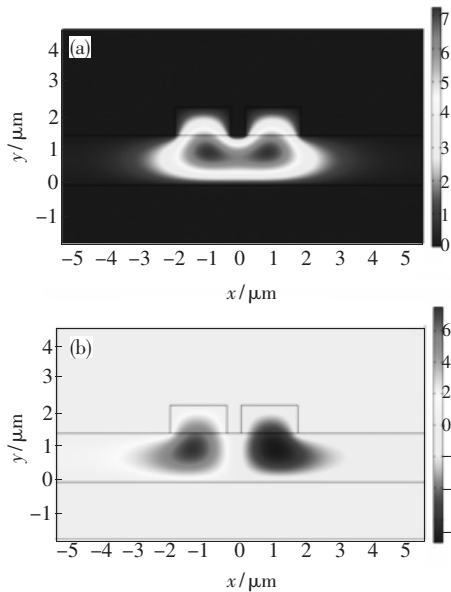


图 6 波导耦合器中偶模 (a) 和奇模 (b) 的光场分布
Fig. 6 Field profiles of (a) even mode and (b) odd mode of SOI-based rib waveguide coupler

以看到,波函数的最低本征值对应于偶模,它源于两条脊型波导基模的耦合。当从波导 1 输入光时,耦合器内激发的光场是偶模和奇模的线性组合。由于两种模式具有不同的波矢量,所以光场能量将以 L_c 为周期进行交换,最大能量交换点发生在耦合长度的整数倍处。

保持其它参数不变 $r = 0.7$ 时,波导耦合器的偶模和奇模的有效折射率与波导间距的关系,如图 7 所示。随着波导间距的增大,偶模和奇模的有效折射率趋近于单一波导的有效折射率。这是由于波导耦合器模间去耦造成的。据(13)式可知,这将使得耦合长度增大,即需要更大的相互作用长度才能使光场由波导 1 完全转移到波导 2 中。

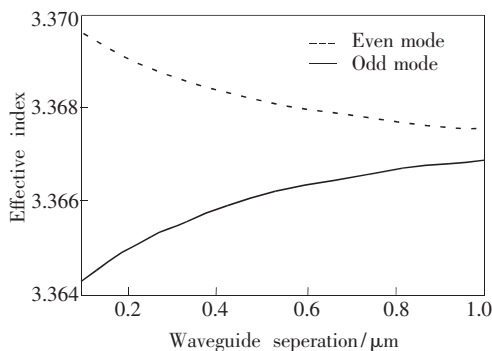


图 7 偶模和奇模有效折射率与波导间距的关系
Fig. 7 Plot of the effective indexes versus waveguide separation

图 8 给出了 SOI 脊型波导耦合器的耦合长度 L_c 随波导间距 d 的变化曲线,取波导芯层厚度 $H = 2 \mu\text{m}$,脊宽 $W = 1 \mu\text{m}$,归一化脊高 $r = 0.7, 0.75, 0.8, 0.85$ 。由图可以看到,波导间距 d 越小,则耦合长度 L_c 越短,耦合系数越大,因而耦合作用越强。当波导间距 $d < 0.8 \mu\text{m}$ 时,深刻蚀(r 较小)波导耦合器的耦合长度短,即耦合作用强,当 $d > 0.8 \mu\text{m}$ 后,浅刻蚀(r 较大)耦合器的耦合作用显著。

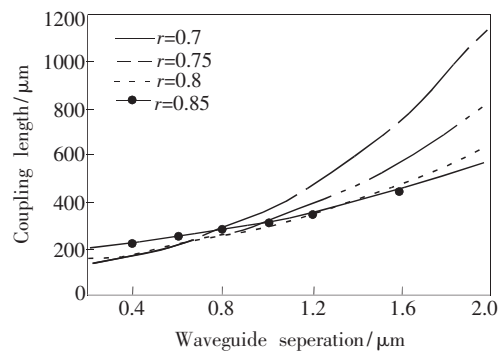


图 8 耦合长度和与波导间距的关系
Fig. 8 Plot of coupling length versus waveguide separation

根据功率耦合系数 $|\kappa|^2$ 和耦合长度 L_c 的关系 ($|\kappa|^2 \propto 1/L_c^2$)^[12],可得到功率耦合系数 $|\kappa|^2$ 与波导间距 d 的关系,如图 9 所示。其中,芯层厚度 H 和脊宽 W 保持不变,相互作用长度 $L = 10 \mu\text{m}$ 。可以看到,与图 8 的变化趋势相反,功率耦合系数随波导间距的增大而减小。在 $d < 1.0 \mu\text{m}$ 的情况下,功率耦合系数随波导间距的减小显著增大。例如,对于 $r = 0.5$ 脊型波导耦合器, $d = 0.4 \mu\text{m}$ 时功率耦合效率约是 $d = 1.0 \mu\text{m}$ 时的 4 倍。而当 $d > 1.0 \mu\text{m}$ 以后,耦合系数随 d 和 r 的变化不大。

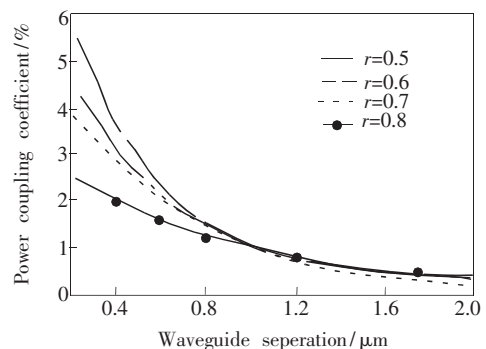


图 9 功率耦合系数与波导间距的关系
Fig. 9 Relationship between power coupling coefficient and waveguide separation

5 结 论

基于FEM分析了SOI基微环谐振器设计中的两个基本问题:单模条件和波导耦合,确定了脊型波导更为精确的单模条件(即 $c=0$),分析了由SOI脊型单模波导构成的双波导耦合器的耦合长度、功率耦合系数与波导间距的关系。模拟结果

表明:在波导间距 $d > 0.8 \mu\text{m}$ 时,刻蚀深度对波导耦合器的耦合长度有显著影响,浅刻蚀的SOI脊型波导耦合器有更强的耦合效应。本文用有限元法将谐振器中耦合系数与具体的波导结构联系起来,解决了传输矩阵分析中耦合参数的选取问题,为SOI基微环谐振器的设计和应用提供了指导。

参 考 文 献:

- [1] Heebner J, Grover G, Ibrahimi T A. *Optical Microresonators: Theory, Fabrication and Application* [M]. Berlin: Springer, 2007.
- [2] Pool J K S, Scheuer J, Mookherjee S, et al. Matrix analysis of microring coupled-resonator optical waveguides [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(1): 90-103.
- [3] Griffel G. Synthesis of optical filters using ring resonator arrays [J]. *IEEE Photon Technol. Lett.*, 2000, **12**(7): 810-812.
- [4] Grover R, Van V, Ibrahim T A, et al. Parallel-cascaded semiconductor microring resonators for high-order and wide-FSR filters [J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(5): 900-905.
- [5] Lu R, Lu Y, Liao J, et al. Single mode condition of polymeric Y-junction rib waveguide [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2007, **28**(4): 617-621 (in Chinese).
- [6] Kawano K, Kitoh T. *Introduction to Optical Waveguide Analysis: Solving Maxwell's Equations and the Schrodinger Equation* [M]. New York: John Wiley & Sons, 2001, 59-115.
- [7] Yin Y, Dai X, Shi Y, et al. Analysis of the single-mode condition for a rib SOI waveguide with a large cross section [J]. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 2005, **34**(5): 669-671 (in Chinese).
- [8] Soref R A, Schmidtchen J, Petermann K. Large single-mode rib waveguides in GeSi-Si and Si-on-SO₂ [J]. *IEEE J. Quantum Electron*, 1991, **27**(8): 1971-1974.
- [9] Rickman A G, Reed G T, Namvar F. Silicon-on-insulator optical rib waveguide loss and mode characteristics [J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(10): 1771-1776.
- [10] Pogossian S P, Vescan L, Vonsovici A. The single-mode condition for semiconductor rib waveguides with large cross section [J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(10): 1851-1853.
- [11] Ng W C, Michael S, Chua S J. The design of triple rib waveguide couplers by the discrete spectral index method [J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(3): 475-482.
- [12] Ma Chunsheng, Liu Shiyong. *Mode Theory for Optical Waveguide* [M]. Changchun: Jilin University Press, 2007, 322-334 (in Chinese).

Finite Element Analysis on SOI-based Microring Resonator Design

XIE Sheng, ZHANG Bin, MAO Lu-hong, GUO Wei-lian,
CHEN Yan, YU Xin, ZHANG Shi-lin

(School of Electronic and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The single mode condition for a rib waveguide with large cross section based on silicon-on-insulator (SOI) is determined through the eigenmode analysis by finite element method (FEM). The mathematic model of waveguide coupler based SOI rib waveguide is established, and the relationships among coupling length,

power coupling coefficient, waveguide dimension and separation are calculated and analyzed under the condition of single mode operation. The simulation results indicate that coupling length L_c increases and power coupling coefficient decreases with increasing the waveguide separation for a SOI rib waveguide with $W = 1 \mu\text{m}$ and $H = 2 \mu\text{m}$. Furthermore, Coupling length L_c increases with increasing the normalized height (r) of rib waveguide when $d < 0.8 \mu\text{m}$, but it decreases with increasing r under the condition of $d > 0.8 \mu\text{m}$. The simulation results provide a guideline for the design and application of SOI-based microring resonator.

Key words: integrated optics; microring resonator; single mode condition; waveguide coupler

CLC number: TN252; TN256 **PACS:** 42.82.Et **PACC:** 4282 **Document code:** A

Received date: 2009-09-02

EI 简介

《工程索引》(The Engineering Index, 简称 EI) 创刊于 1884 年, 是美国工程信息公司(Engineering information Inc.) 出版的著名工程技术类综合性检索工具。EI 每月出版 1 期, 文摘 1.3 万至 1.4 万条; 每期附有主题索引与作者索引; 每年还另外出版年卷本和年度索引, 年度索引还增加了作者单位索引。出版形式有印刷版(期刊形式)、电子版(磁带)及缩微胶片。EI 选用世界上工程技术类几十个国家和地区 15 个语种的 3 500 余种期刊和 1 000 余种会议录、科技报告、标准、图书等出版物。年报道文献量 16 万余条。收录文献几乎涉及工程技术各个领域。例如: 动力、电工、电子、自动控制、矿冶、金属工艺、机械制造、土建、水利等。它具有综合性强、资料来源广、地理覆盖面广、报道量大、报道质量高、权威性强的特点。

EI Compendex 是全世界最早的工程文摘来源。EI Compendex 数据库每年新增的 50 万条文摘索引信息分别来自 5 100 种工程期刊、会议文集和技术报告。EI Compendex 收录的文献涵盖了所有的工程领域, 其中大约 22% 为会议文献, 90% 的文献语种是英文。

EI 公司在 1992 年开始收录中国期刊。1998 年 EI 在清华大学图书馆建立了 EI 中国镜像站。

2009 年以前, EI 把它收录的论文分为两个档次。

1. EI Compendex 标引文摘(也称核心数据)。它收录论文的题录、摘要, 并以主题词、分类号进行标引深加工。有没有主题词和分类号是判断论文, 是否被 EI 正式收录的唯一标志。

2. EI Page One 题录(也称非核心数据)。主要以题录形式报道。有的也带有摘要, 但未进行深加工, 没有主题词和分类号。所以 Page One 带有文摘不一定算做正式进入 EI。

EI Compendex 数据库从 2009 年 1 月起, 所收录的中国期刊数据不再分核心数据和非核心数据。

EI 对稿件内容和学术水平的要求

1. 具有较高的学术水平的工程论文, 包括的学科有:

机械工程、机电工程、船舶工程、制造技术等;

矿业、冶金、材料工程、金属材料、有色金属、陶瓷、塑料及聚合物工程等;

土木工程、建筑工程、结构工程、海洋工程、水利工程等;

电气工程、电厂、电子工程、通讯、自动控制、计算机、计算技术、软件、航空航天技术等;

化学工程、石油化工、燃烧技术、生物技术、轻工纺织、食品工业;

工程管理。

2. 国家自然科学基金资助项目、科技攻关项目、“八六三”高技术项目等。

3. 论文达到国际先进水平, 成果有创新。

EI 不收录纯基础理论方面的论文。