

文章编号:1004-4213(2011)10-1603-4

基于 slot 波导的硅基长波红外偏振 无关定向耦合器分析

李国熠, 魏玉欣, 周强, 杨建义, 王明华, 江晓清

(浙江大学 信息与电子工程学系, 杭州 310027)

摘 要: 硅基长波红外集成光电子器件是集成光学发展的一个新兴领域, 阐述了利用等比例放大原理设计该波段下的 slot 波导的思路, 分析了波导的限制因子、偏振特性等性质, 并提出了工作波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 的偏振无关 slot 波导定向耦合器。

关键词: 长波红外波段; 等比例放大原理; slot 波导; 偏振无关定向耦合器

中图分类号: TN252

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114010.1603

0 引言

进入 21 世纪以来, 全光网络的发展极大地带动了硅基光电子器件的发展. 硅材料因为不具备一阶电光效应和受激辐射效应^[1], 长期没有受到研究人员的重视. 但是随后研究发现, 硅材料具有显著的等离子体色散效应可以通过改变载流子浓度调节折射率和吸收损耗^[2], 实现电光调制^[3-4]. 另一方面, 硅基光电子器件可以采用成熟的 CMOS 工艺使得生产低成本、高性能的商用器件成为可能, 因此不断有各种新型光互连、传感器件的报道^[5-6].

当前主要研究和投入市场的器件主要使用通信波段的近红外光 ($1.55 \mu\text{m}$ 为主), 但是波长更长的红外光同样应用广泛, 特别是在传感、通信、成像等领域. 将硅基集成光学器件的应用推进到中长波红外波段内, 将是集成光学发展历程上一次伟大的飞跃, 正如 R. A. Soref 称其为“Migration of Si-based OEICs into the 1.55 to $100 \mu\text{m}$ region”^[1], 相信在未来新型硅基长波红外集成光学器件将大有可为.

本文提出了一种基于等比例放大原理, 设计长波红外情况下 slot 波导尺寸的设计思路, 并分析了采用 slot 波导构成的偏振无关定向耦合器的特性.

1 基础分析

Slot 波导也是由基于全内反射的介质波导结构, 但不同于传统意义上将光场限制在芯层为高折

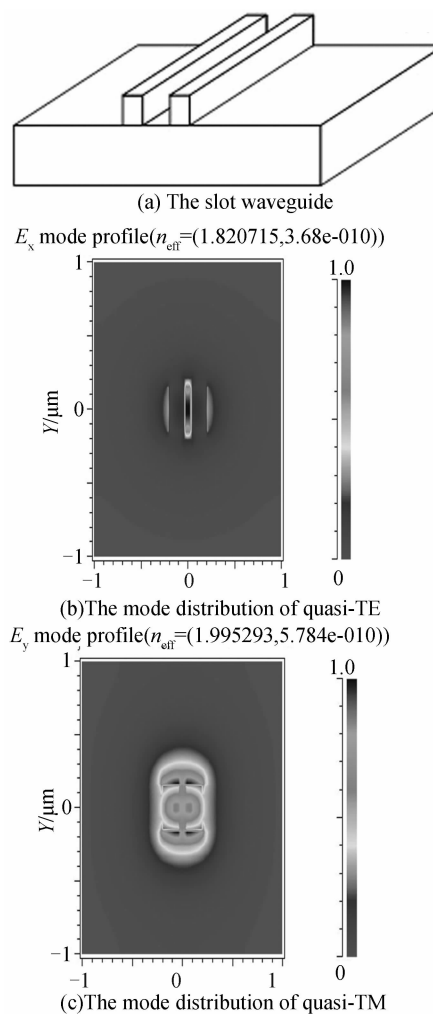


图 1 slot 波导结构及该波导准 TE、TM 模的场分布
Fig. 1 The slot waveguide and the mode distributions of quasi-TE and quasi-TM

基金项目: 国家重大基础研究发展计划项目 (No. 2007CB613405) 资助

第一作者: 李国熠 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为集成光学. Email: lgyarthur@zju.edu.cn

导师: 江晓清 (1959-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为集成光学. Email: iseejq@zju.edu.cn

收稿日期: 2010-07-30; 修回日期: 2011-03-16

射率区,包层是低折射率区的波导,其光场主要限制在低折射率区中^[7],若将各种聚合物材料填在其中可用作传感^[7].它由两根条波导(或脊波导)构成,中间存在一个宽度为 w_s 的低折射率区域——slot 区域,由于电位移矢量 \mathbf{D} 在 slot 边界处是连续的,而电场强度不连续,两波导的倏逝场在 slot 区域内发生叠加,使得低折射率区中的电场强度远远高于波导之内。

利用等比例放大原理,通过计算等效波长可以设计出波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 情况下的 slot 结构器件.利用文献[8]中的 slot 尺寸,分别计算 $1.55 \mu\text{m}$ 和 $10.6 \mu\text{m}$ 的等效波长,并考虑硅和二氧化硅的色散效应^[1]对折射率的影响.经过等比例放大后的 slot 的高度为 $2.0999 \mu\text{m}$,宽度为 $1.2599 \mu\text{m}$,衰减长度 γ_s 随着波长的增加而大大增加,可以实现 $\lambda/10$ 尺度的狭缝宽度.准 TE 模的电场强度在边界处突变与其折射率的平方成正比 $n_H^2/n_C^2 = 1.84$,远远低于 $1.55 \mu\text{m}$ 的情况.故后文中将低折射率区的填充层材料改变为空气来分析,则 $n_C = 1$, $n_H^2/n_C^2 = 11.6964$,电场的跳变比二氧化硅作为填充层的情况更为明显。

由限制因子的计算公式^[9]

$$\Gamma = \frac{\iint_C |E(x,y)|^2 dx dy}{\iint_{ss} |E(x,y)|^2 dx dy} \quad (1)$$

可得到 TE 模和 TM 模的限制因子分别是 62% 和 19%,和波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 时的限制因子值接近,从而验证等比例放大原理在波长变化时设计器件尺寸的指导作用。

通过改变 slot 区域内的折射率可以知道:狭缝内折射率变化对准 TE 模的等效折射率的影响很大,而对准 TM 模的等效折射率影响不大.这是因为对准 TE 模而言,光场主要限制在 slot 区域内,而对准 TM 模则不然,这一点和通信波段内 slot 波导的性质是一致的。

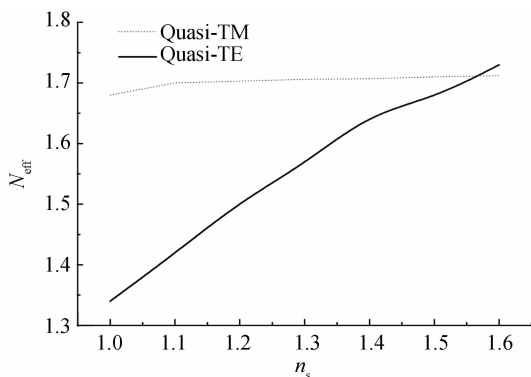


图 2 Slot 内折射率的变化对准 TE 和准 TM 模的等效折射率的影响

Fig. 2 The impact of effective index of quasi-TE and quasi-TM when the change of n_s in slot waveguide

2 slot 波导偏振无关定向耦合器

定向耦合器是全光通信中作为光开关的重要器件^[10].本文利用前文中分析的 slot 波导尺寸,提出了一种长波红外情况下的偏振无关定向耦合器。

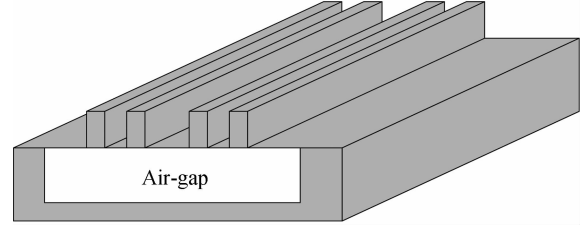


图 3 基于 slot 波导的定向耦合器

Fig. 3 The structure of directional coupler based on slot waveguides

由耦合模理论可知,电场强度 E_1 、 E_2 由式(2)和(3)计算可得^[11]

$$\frac{dE_1}{dz} = i\kappa_{11}E_1 + i\kappa_{12}E_2 e^{i2\pi/\lambda(N_{\text{eff}2} - N_{\text{eff}1})z} \quad (2)$$

$$\frac{dE_2}{dz} = i\kappa_{21}E_1 e^{i2\pi/\lambda(N_{\text{eff}1} - N_{\text{eff}2})z} + i\kappa_{22}E_2 \quad (3)$$

Z 是传播方向, κ_{ij} ($i, j = 1, 2$) 是耦合系数, $N_{\text{eff}1}$ 和 $N_{\text{eff}2}$ 分别为利用有限元算法计算出两 slot 波导干涉臂的等效折射率。

设两 slot 波导干涉臂(图 3)输出功率为 P_1 (左侧)和 P_2 (右侧),那么根据耦合理论^[11],则有

$$P_1 = \Psi^2 \frac{\kappa^2}{\beta_c^2} [\cos(\beta_c L)]^2 + \Psi^2 \frac{\sigma^2}{\beta_c^2} \quad (4)$$

$$P_2 = \Psi^2 \frac{\kappa^2}{\beta_c^2} [\sin(\beta_c L)]^2 \quad (5)$$

式中 Ψ 是电场强度在波导中的传输损耗, L 为耦合长度

$$\beta_c^2 = \kappa^2 + \sigma^2, \kappa^2 = \kappa_{12}\kappa_{21} \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{\pi}{\lambda} (N_{\text{eff}1} - N_{\text{eff}2}) + \frac{\kappa_{22} - \kappa_{11}}{2} \quad (7)$$

$$\kappa_{22} - \kappa_{11} = \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} [n^2(x,y) - n_1^2(x,y)] \iint_{u_2} |E_1(x,y)|^2 dx dy \right\} - \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} (n^2(x,y) - n_2^2(x,y)) \iint_{u_1} |E_2(x,y)|^2 dx dy \right\} \quad (8)$$

这里, $n(x,y)$ 是耦合区的折射率分布。

如果 β_e 和 β_o 分别是偶对称模和奇对称模的传播常数,那么耦合长度 L 是指偶对称模和奇对称模之间产生的相位差为 π 时,即位于左侧光波导的全部光功率都转移到右侧光波导中时的波导长度。

根据上述公式,使用 Matlab 软件所编写的有限差分算法来分别计算该波导对应的偶对称模和奇对称模的等效折射率和传播常数来求解耦合长度。

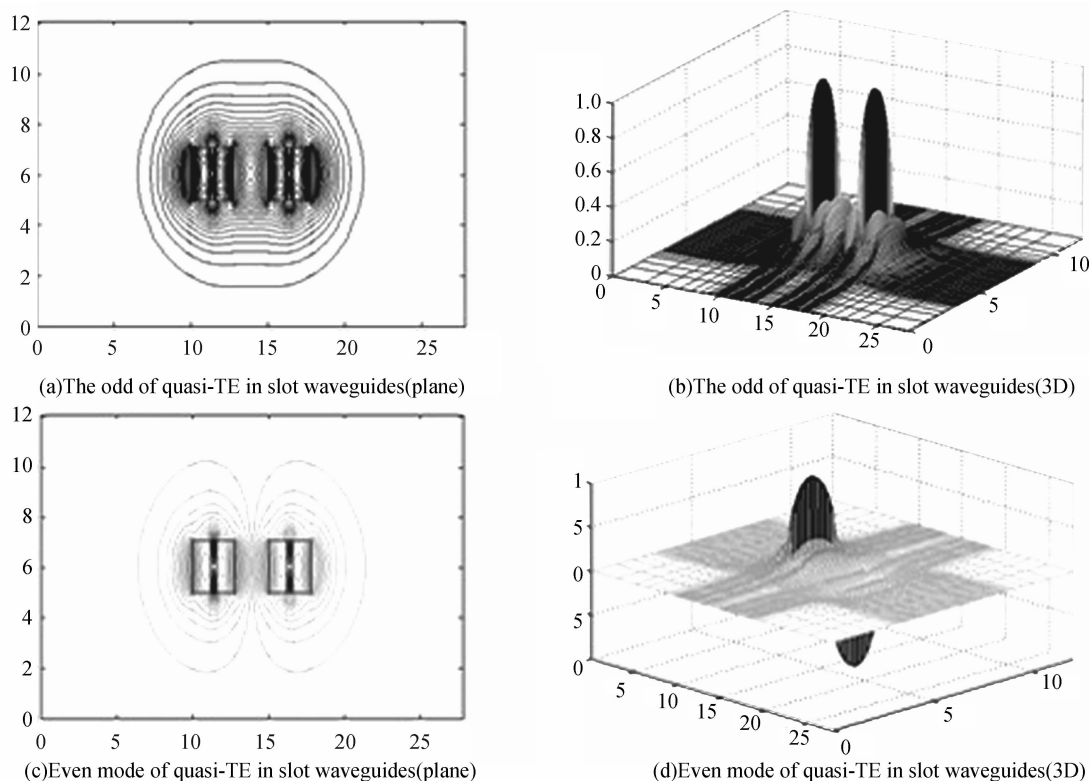


图4 slot 波导定向耦合器中准 TE 模偶对称模和奇对称模场分布图

Fig. 4 The odd of quasi-TE in slot waveguides and even mode of quasi-TE in slot waveguides

准 TE 模和准 TM 模在 Slot 定向耦合器中有着不同的耦合长度 L , 因为其准 TE 模的电场和准 TM 模的在 slot 区域内的限制因子是不同的, 准 TE 模的电场主要被限制在 slot 区域内, 所以耦合长度和 slot 区域折射率有关, 而准 TM 模不是, 利用这个特点, 可以通过将器件尺寸设计在它们的交点上, 实现一个长波红外情况下与偏振无关的 slot 定向耦合器^[12].

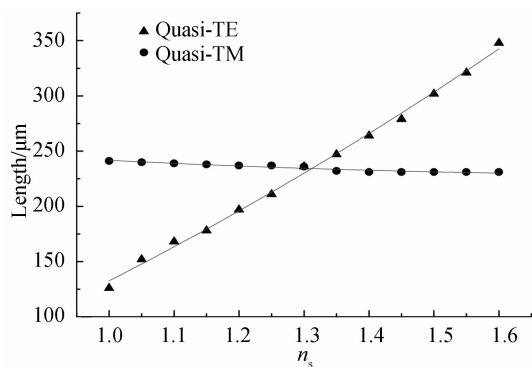


图5 slot 中折射率的改变对准 TE 模和准 TM 模的耦合长度 L 的影响

Fig. 5 The change of coupler length for quasi-TE and quasi-TM when the change of index in the slot waveguides

准 TE 模的耦合长度对 n_s 的变化是很敏感的, 而准 TM 模则变化不大. 所以通过选取两条线的交点可以得到一个长波红外情况下与偏振无关的定向耦合器器件参数, 填充层折射率 $n_s = 1.305$, 耦合器

间距为 $5 \mu\text{m}$, 耦合区长度为 $236 \mu\text{m}$.

3 结论

通过分析、计算和仿真, 本文证明了等比例放大原理对长波红外情况下设计 slot 波导具有指导意义. 在中长波红外波段内的 slot 波导具有更大的狭缝宽度, 可以实现 $\lambda/10$ 尺度的 slot 宽度, 并且降低了制备器件的难度. 最后还提出了一种基于 slot 波导的长波红外情况下偏振无关的定向耦合器. 中长波波段的集成光学器件在生物、化学、传感、军事等领域内具有广泛的应用潜力, 相信会逐渐成为研究的热点.

参考文献

- [1] SDFEF R, EMELETT S J, BUCHWALD W. Silicon waveguided components for the long-wave infrared region [J]. *Journal of Optics Part A*, 2006, **10**(8): 840-848.
- [2] SOREF R, BENNETT B. Electro-optical effects in silicon [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1987, **23**(1): 123-129.
- [3] LIU A, LIAO L, JONES R, et al. High-speed optical modulation based on carrier depletion in a silicon waveguide [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(2): 660-668.
- [4] ZHAO Yong, JIANG Xiao-qing, YANG Jian-yi, et al. Silicon-based CMOS photonic devices using carrier dispersion effect [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(10): 2485-2490.
赵勇, 江晓清, 杨建义, 等. 载流子色散型硅基 CMOS 光子器件 [J]. *光子学报*, 2009, **38**(10): 2485-2490.
- [5] LIRA H L R, MANIPATRUNI S, LIPSON M. Broadband hitless silicon electro-optic switch for on-chip optical networks [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(25): 22271-22280.
- [6] DELL'OLIO F, PASSARO V M. Optical sensing by optimized

- silicon slot waveguides [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(8):4977-4993.
- [7] YANG Ji-chao, SONG Mu-ping. Dispersion characteristics and the application for dispersion compensation of silicon slot optical waveguides[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(3):417-422.
杨纪超, 宋牟平. 硅狭缝光波导的色散特性及其色散补偿应用的研究[J]. *光子学报*, 2010, **39**(3):417-422.
- [8] XU Qian-fan, ALMEIDA Vilson R, PANEPUCCI R R, *et al.* Experimental demonstration of guiding and confining light in nanometer-size low-refractive-index material [J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(14):1626-1628.
- [9] ARMAROLI A, MORAND A, BENECH P, *et al.* Comparative analysis of a planar slotted microdisk resonator [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(18):4009-4016.
- [10] SUN Xiao-qiang, GAO Wei-nan, SUN Jie, *et al.* Polymer 2×2 directional coupler electro-optic switches[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(12):3084-3087.
孙小强, 高伟男, 孙杰, 等. 聚合物 2×2 定向耦合型电光开关[J]. *光子学报*, 2009, **38**(12):3084-3087.
- [11] DELL'OLIO F, PASSARO V M, CIMINELLI C, *et al.* Efficient chemical sensing by coupled slot waveguides [J]. *Sensors*, 2009, **9**:1012-1032.
- [12] FUJISAWA T, KOSHIBA M. All-optical logic gates based on nonlinear slot-waveguide couplers[J]. *JOSA B*, 2006, **23**(4):684-691.

Analysis of Polarization-independent Optical Directional Coupler Based on Slot Waveguides for Long-wave Infrared

LI Guo-yi, WEI Yu-xin, ZHOU Qiang, YANG Jian-yi, WANG Ming-hua, JIANG Xiao-Qing
(Department of Information Science and Electronics Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The research of long-wave infrared silicon waveguided components is triggered by the development of integrated optic devices. The validity of Scale-up principle for designing the size of slot waveguides in this waveband is demonstrated, the characteristics such as contain factor and polarization were explained. The polarization-independent optical directional coupler based on slot waveguides was attained at the wavelength of 10.6 μm .

Key words: Long-wave infrared; Scale-up principle; Slot waveguides; Polarization-independent optical directional coupler