

doi: 10.3788/gzxb20174607.0723003

一种非矩形截面对浅刻蚀 SOI 脊形波导 侧向泄漏损耗的影响

张明, 陶京, 周寒青, 王昌辉

(浙江工业大学 理学院, 杭州 310023)

摘 要: 为了进一步探索用绝缘体上晶体硅制作的浅刻蚀脊形波导侧向泄漏损耗的规律, 提出并研究了一种非矩形截面浅刻蚀绝缘体上晶体硅脊形波导. 用光的干涉理论建立该波导的周期性损耗模型并推导出损耗周期公式, 然后通过完美匹配层边界条件下的频域有限元法仿真观察该特殊波导类 TM_0 模的侧向泄漏损耗周期的变化与最大损耗点的偏移现象. 周期大小的仿真结果与理论计算符合度较高, 其平均相对误差仅 0.56%. 此外, 发现该类波导在某些沟槽宽度下可以通过改变截面来实现对类 TM_0 模损耗从最大到最小的调节, 而在另外一些沟槽宽度下, 类 TM_0 模损耗对截面变化不敏感. 研究结果可以简化波导加工并提高制作容差, 为该类型波导的设计与制作提供参考.

关键词: 导波光学; 浅刻蚀脊形波导; 绝缘体上晶体硅; 泄漏波; 光损耗

中图分类号: TN252

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)07-0723003-8

Impact of Lateral Leakage Loss in a Kind of Shallowly-etched Rib Waveguides on SOI with Non-rectangular Cross-section

ZHANG Ming, TAO Jing, ZHOU Han-qing, WANG Chang-hui

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

Abstract: In order to further investigate the lateral leakage loss behavior of shallowly-etched rib waveguides on silicon-on-insulator, a kind of shallowly-etched rib waveguide with non-rectangular crosssection was proposed and analyzed. A periodical loss model and a formula of loss period of this waveguide were obtained by the interference theory, and then phenomena of periodic variation of lateral leakage loss and shift of the maximum loss point for TM_0 -like mode were observed through the finite element method simulation in frequency domain with perfectly-matched layer conditions. The period in simulation results are highly consistent with theoretical calculation, and the average relative error is only 0.56%. In addition, it is found that TM_0 mode loss can be adjusted from maximum to minimum by changing the cross section of rib waveguides with some trench widths, while TM_0 mode loss is not sensitive to the change of cross section in rib waveguide with other trench widths. These findings can simplify process and improve fabrication tolerance, which provide theoretical guidance for the design and fabrication of this kind of waveguide.

Key words: Guidewave optics; shallowly-etched ridge waveguides; silicon-on-insulator; leaky wave; optical losses

OCIS Codes: 230.7370; 130.3120; 060.4510

0 引言

贝尔实验室在加载条状波导的基础上提出了脊形波导的概念^[1], 这种脊形波导被广泛用于定向耦合器、

基金项目: 浙江省自然科学基金(No. LY16F050008)资助

第一作者: 张明(1975—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光通信器件. Email: cim2046@zjut.edu.cn

收稿日期: 2016-12-26; 录用日期: 2017-03-21

<http://www.photon.ac.cn>

调制器及偏振器中. 损耗是决定波导性能重要的参量之一, 而侧向泄漏是脊形波导损耗的主要原因. PENG S 等最先在理论上预测了脊形波导损耗周期性变化的谐振效应^[2], 随后分析了这种源于横磁 (Transverse Magnetic, TM) 与横电 (Transverse Electric, TE) 模式转化的侧向泄漏损耗^[3]. OGUSU K 用模式匹配法详细分析了这种泄漏损耗, 并计算了脊形波导前三个模式的衰减常量^[4]. 2007 年, WEBSTER M 等理论分析并且实验观察到浅刻蚀绝缘体上晶体硅 (Silicon-On-Insulator, SOI) 脊形波导中存在一些特殊宽度使得 TM-TE 模式转化减弱甚至消失, 从而实现类 TM_0 模的超低损耗^[5], SOI 材料拥有低廉的价格与完备的材料体系. 2008 年 KOSHIBA M 等提出了一种在脊形中心加入凹槽的新型脊形波导, 可以进一步改善波导的泄漏损耗^[6]. 2009 年, XU Xue-jun 等证明了浅刻蚀脊形波导 TM_0 模的固有损耗, 并用全矢量薄膜模式匹配法仿真分析了类 TM_0 模的低损耗点^[7]. NGUYEN T 等建立了浅刻蚀脊形波导侧向损耗及定向耦合器的严格模型, 并对泄漏损耗进行了精确求解^[8]. 随后, DAI Dao-xin 等利用这类波导中 TE 模与 TM 模损耗的巨大差异设计出通 TE 的高消光比偏振器^[9]. AKO T 等将浅刻蚀 SOI 脊形波导的上包层换成液晶, 从而实现利用电来对波导类 TM 模损耗的调谐^[10-11]. YEGO K 等利用 TM 模侧向泄漏辐射出来的强倏逝波设计了一种精确测量生物膜的 SOI 集成光波导传感平台^[12]. 近两年, HOPE A 等利用标准硅光子铸造平台设计并制作了特殊脊宽下低损耗 TM 模的脊形波导, 实验观察到其 TM 损耗低至 0.087dB/mm, 使得这种波导可应用于生物传感与量子信息处理之中^[13-14].

文献[5]中用热氧法处理标准脊形波导后, 原波导矩形横截面的两个上顶角出现圆弧状, 会导致 TM_0 模低损耗点的脊宽范围有所增大. 对此, 作者仅仅解释为在脊形边界处 TM-TE 模式转化减弱造成的, 并没有给出深入的分析, 不过对于这种用非矩形截面来获得更加优良 TM 模损耗特性的可能性给予了肯定, 因而进一步研究非矩形截面浅刻蚀脊形波导的损耗非常必要.

本文提出一种新颖的非矩形截面脊形波导, 这种结构是将矩形截面两上顶角变为圆弧状. 探讨了该波导中发生的模式转化, 用光的干涉理论分析了侧向泄漏损耗并得到了谐振周期公式. 通过完美匹配层边界条件下的频域有限元法对波导进行仿真, 得到该波导的有效折射率与损耗图, 发现在脊形波导沟槽宽度固定时可以通过改变截面来调节类 TM_0 模损耗大小, 而在某些特定沟槽宽度时, 波导损耗对截面形状不敏感, 始终保持在较低水平, 从而可提高制作容差.

1 波导结构与理论分析

如图 1, 非矩形截面脊形波导被划分为三个区, 分别为脊区、沟槽区、外层区, 其中脊区为波导芯层, 沟槽区与外层区为波导侧向包层. w_{co} 为脊形波导的芯层宽度, w_r 为沟槽区宽度, 圆弧参量 w_{arc} 为脊形顶角 C 点到脊形上边 B 点的距离, t_1 为脊区与外层区硅厚度, t_2 为沟槽区硅厚度, h_r 为脊高. 设定 $t_1 = 0.7 \mu\text{m}$, $t_2 = 0.56 \mu\text{m}$, $w_{co} = 0.8 \mu\text{m}$, $h_r = 0.14 \mu\text{m}$, 真空中入射波长为 1 550 nm, $n_3 = n_{\text{air}} = 1$, $n_2 = n_{\text{SiO}_2} = 1.445$, $n_1 = n_{\text{Si}} = 3.455$. 传统的普通脊形波导的脊区如图 1 中椭圆框中的子图所示, 与之相比, 非矩形截面脊形波导将矩形截面的两个上顶角改为圆弧状, 圆弧连接半脊高点到脊形上边 B 点, 并且圆弧与脊形上边在 B 点相切, 该圆弧是唯一确定的, 其圆心在 B 点的垂线下方, 圆弧的半径与圆心会随着 w_{arc} 的变化而变化.

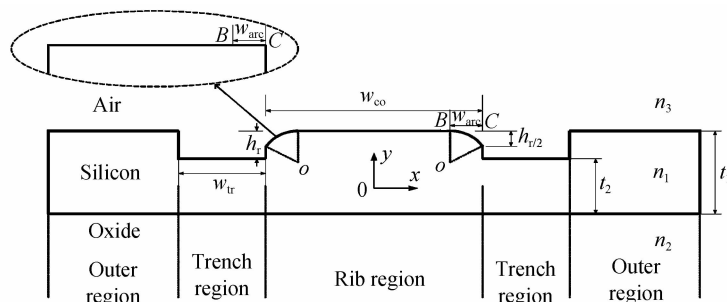


图 1 非矩形截面脊形波导截面

Fig. 1 Cross section of non-rectangular rib waveguides

在这种非矩形截面浅刻蚀 SOI 脊形波导的 y 方向, 由于上表面 (空气与硅) 和下表面 (硅与二氧化硅) 的高折射率差, 光场被强烈束缚于硅波导层, 在 x 方向, 由于硅层的阶梯变化, 光场也会被束缚于硅层的脊区,

但这种束缚不是强束缚.如图 2,普通 TE 模拥有 E_{x0} 、 H_{y0} 、 H_{z0} 三个分量,但脊形波导中实际光线在波导纵向传播时会沿着 z 方向偏离一个小角 α ,于是获得附加的较小的 H_x 与 E_z ,这两个较小分量会在脊区边界处发生 TE/TM 模式耦合,获得另外一个分量 E_y ,使得传播在脊形波导内的普通 TE 模变为类 TE 模^[3],同理波导中普通 TM 模也会变成类 TM 模,这些模式都是拥有全部六个场分量的杂化模.

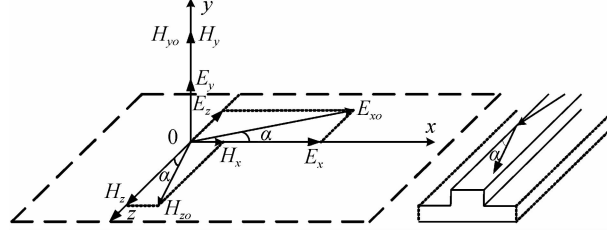


图 2 脊形波导中类 TE 模的模式杂化现象示意图

Fig. 2 Mode hybridization of TE-like mode in rib waveguide

由于脊区中类 TE 模与类 TM 模在脊区边界处发生 TE/TM 模式耦合^[2-4],波导可能会产生侧向泄漏损耗.如果侧向包层中由脊形芯层导模耦合得到的模式很快消逝,那么芯层这个模式将不会发生模式转化,从而维持芯层导模的极低损耗;而如果侧向包层中耦合得到的模式在侧包层中可以传输,那么芯层这个模式将会由于模式转化产生固有的侧向损耗.

由图 3 中平板波导有效折射率的变化可以发现,平板波导 TE_0 模与 TM_0 模的有效折射率都会随着平板厚度的增加而增加,并且 TE_0 模位于 TM_0 模上方, t_1 为脊区硅厚度, t_2 为沟槽区硅厚度,分别对应波导脊区与沟槽区的平板波导, $n_{\text{eff,TE,core}}$ 、 $n_{\text{eff,TM,core}}$ 与 $n_{\text{eff,TE,clad}}$ 、 $n_{\text{eff,TM,clad}}$ 分别代表对应脊区与沟槽区平板波导的 TE_0 模、 TM_0 模有效折射率.波导的类 TE 模有效折射率 $N_{\text{eff,TE-like}}$ 在 $n_{\text{eff,TE,core}}$ 与 $n_{\text{eff,TE,clad}}$ 之间,类 TM 模有效折射率 $N_{\text{eff,TM-like}}$ 在 $n_{\text{eff,TM,core}}$ 与 $n_{\text{eff,TM,clad}}$ 之间,可以观察到 $N_{\text{eff,TE-like}}$ 大于 $N_{\text{eff,TM-like}}$,由于传播常量 $\beta = k_0 N$,那么类 TE 模的传播常量也会比类 TM 模大,也就是 $\beta_{\text{TE-like}} > \beta_{\text{TM-like}}$,如图 4.

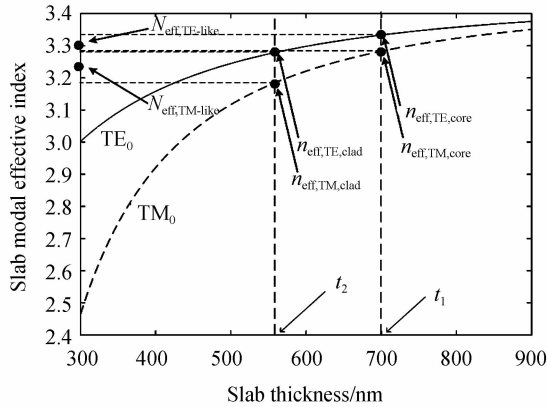


图 3 平板波导模式有效折射率随平板厚度的变化以及脊形波导 TE-like 与 TM-like 模的有效折射率

Fig. 3 Variation of slab waveguide modal effective indexes with slab thickness, and the modal effective index for TE-like and TM-like modes in rib waveguide

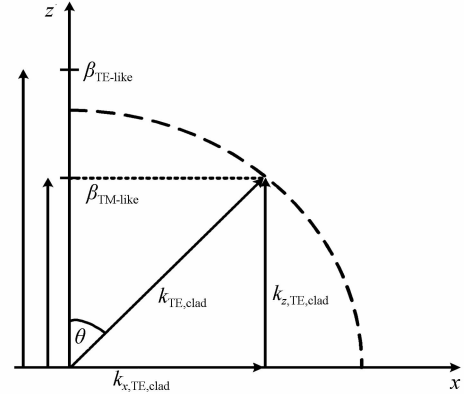


图 4 TM-TE 模式转化的相位匹配示意图

Fig. 4 Phase-match diagram of TM-TE mode conversion

对于类 TE 模, $N_{\text{eff,TE-like}}$ 要大于 $n_{\text{eff,TE,clad}}$ 与 $n_{\text{eff,TM,clad}}$,所以类 TE 模在侧包层中因耦合而产生的 TE 模与 TM 模场都是指数衰减,从而不会产生侧向泄漏;而对于类 TM 模, $N_{\text{eff,TM-like}}$ 大于 $n_{\text{eff,TM,clad}}$ 但小于 $n_{\text{eff,TE,clad}}$,因此侧包层中因耦合而产生的 TM 模场也会很快消逝,但是产生的 TE 模场会相位匹配成包层 TE 导模^[5].如图 4, $k_{\text{TE,clad}}$ 为包层 TE 模波矢, $k_{x,\text{TE,clad}}$ 与 $k_{z,\text{TE,clad}}$ 为其在 x 与 z 两个方向上的分量;当 $n_{\text{eff,TE,clad}}$ 大于 $N_{\text{eff,TM-like}}$ 时, $k_{\text{TE,clad}}$ 大于 $\beta_{\text{TM-like}}$,因此会存在某个角 θ 使得 $\beta_{\text{TM-like}} = k_{\text{TE,clad}} \cos\theta = k_{z,\text{TE,clad}}$,从而在 z 方向发生相位匹配,最终会将因耦合而产生于侧包层中的 TE 模场匹配成包层 TE 导模,进而完成芯层的类 TM 模转化成包层 TE 导模的过程,即脊形波导的 TM-TE 模式转化.在非矩形截面浅刻蚀 SOI 脊形波导中类 TM 模也会表现出一种侧向泄漏损耗,而类 TE 模不会出现这种情况.

图 5 展示了 TM-TE 转化达到最大,也就是泄漏损耗达到最大值(谐振点)的理论模型,可以通过干涉理论唯象地解释谐振点.光线 TM^1 与 TM^2 从底端出发,#1 为脊区与沟槽区分界面,#2 为沟槽区与外层区分界面, TM^1 经过界面 #1 后发生 TM-TE 转化,转化后的 TE^1 经过两次反射与 TM^2 转化的 TE^2 发生干涉相长,从而实现最大损耗.由于 z 方向传播常量相同,所以沿着波导方向相位改变相同,仅需考虑两个光线 x 方向的相位差即可,得到谐振条件为

$$2\omega_{tr}k_{x,TE,clad} + \varphi_1 + \varphi_2 - k_{x,TM-like}r = 2m\pi \quad m=1,2,3,\dots \quad (1)$$

$$\omega_{tr} = \frac{2m\pi + k_{x,TM-like}r - \varphi_1 - \varphi_2}{2k_{x,TE,clad}} \quad m=1,2,3,\dots \quad (2)$$

式中, $k_{x,TE,clad}$ 为沟槽中 TE 模的波矢 x 分量; $k_{x,TM-like}$ 为脊区类 TM 模的波矢 x 分量,会随着圆弧参量 ω_{arc} 的变化而改变, $k_{x,TM-like} = \beta_{TM-like} \tan \alpha = k_0 N_{eff,TM-like} \tan \alpha$,其中 α 为光线偏离 z 方向的角度,圆弧状截面引起的脊区硅层厚度变化会导致波导传播常量发生变化,从而引起 $k_{x,TM-like}$ 发生变化.从仿真结果来看,当圆弧参量 ω_{arc} 增大时 $N_{eff,TM-like}$ 会减小,从而引起 $k_{x,TM-like}$ 减小; r 为 TM^2 与界面 #1 处 TM^1 的等相位点 A 到界面 #1 的垂直长度,为定值; φ_1 与 φ_2 为 TM^1 两次反射获得的额外相位.式(1)中当 ω_{arc} 为定值时,等号左侧后三项为定值,式(1)变为 $2\omega_{tr}k_{x,TE,clad} + \varphi = 2m\pi$, $m=1,2,3,\dots$,可以得到两个谐振点之间的距离,也就是谐振周期的大小 $\Delta\omega_{tr}$,即

$$\Delta\omega_{tr} = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{n_{eff,TE,clad}^2 - N_{eff,TM-like}^2}} \quad (3)$$

式中, $n_{eff,TE,clad}$ 为沟槽区厚度的平板波导 TE 模的有效折射率, $N_{eff,TM-like}$ 为脊形波导类 TM 模的有效折射率.

2 仿真结果与讨论

HUANG Hui 等用有限元法模式求解器综合分析了 1 550 nm 波长下不同截面的脊形波导的单模条件^[15],故选择完美匹配层边界条件下的频域有限元法对波导非矩形截面进行模式分析,可以得到模场图和所有本征模的有效折射率及传播常量.泄漏损耗的计算公式为^[9]

$$L_p = 20\log_{10}[\exp(-n_{im}k_0l_0)] \quad (4)$$

式中, n_{im} 为本征模有效折射率的虚数部分, k_0 为真空中的波数($k_0 = 2\pi/\lambda_0$), λ_0 为真空中波长 1 550 nm, l_0 为非矩形截面脊形波导的长度,设定 $l_0 = 1$ mm.

2.1 非矩形波导的模式分析与泄漏损耗

仿真中设定非矩形截面脊形波导的 SOI 硅层厚度 $t_1 = 700$ nm,如图 1,对于浅刻蚀脊形波导,通常情况下 $h_r = 0.15t_1 \sim 0.25t_1$ ^[9],选择刻蚀深度 $h_r = 140$ nm,脊宽 $w_{co} = 0.8$ μm ,刻蚀宽度 w_{tr} 变化范围为 2~7 μm ,圆弧参量 $\omega_{arc} = 240$ nm.

图 6 和图 7 显示了浅刻蚀 SOI 非矩形截面脊形波导中 TE_0 模、 TM_0 模与 TE 高阶模三个本征模的有效折射率与泄漏损耗随着沟槽宽度 w_{tr} 的变化,这三个模都是杂化模.其中, TE_0 杂化不明显,与普通 TE_0 模相似,以电场分量 E_x 为主, E_y 微弱,容易分辨;而 TM_0 与 TE 高阶模都是明显的杂化模式, E_x 与 E_y 差不多在一个数量级, TM_0 与 TE 高阶模相仿,不容易区分,区分方法是查看其能量密度分布图,当能量存在于脊区时为 TM_0 ,而当能量分布于沟槽区时为 TE 高阶模.

通过图 6(a)可以发现,随着沟槽区宽度 w_{tr} 的变化, TE_0 模的有效折射率在 3.296 6~3.296 8 之间浮动,变化十分微弱.通过图 6(b)可以发现,由于波导对 TE_0 模的强束缚,其泄漏损耗会维持在很低的水平,但当沟槽区宽度 w_{tr} 增加时,损耗会迅速降到很低水平,到 $w_{tr} \geq 4.9$ μm 时,其泄漏损耗小于 0.001 1 dB/mm,

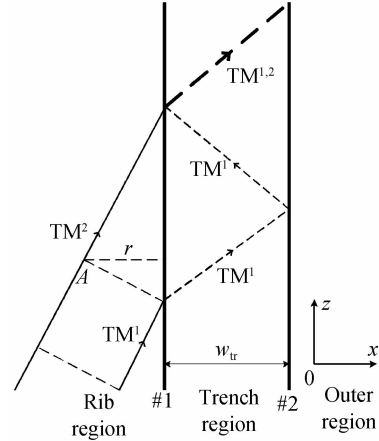


图 5 TM-TE 模式转化的谐振理论模型示意图
Fig. 5 Resonance theory model diagram of TM-TE mode conversion

几乎可以忽略不计.这是由于当沟槽宽度较小时,包层中的倏逝波会细微泄漏,当波导的沟槽宽度增加时,这种泄漏会呈指数衰减.

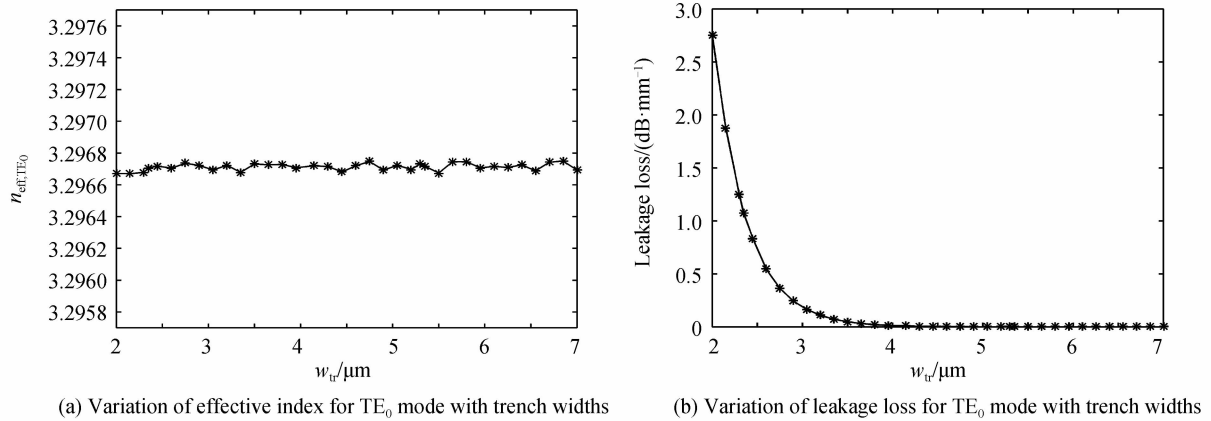


图 6 TE₀ 模随沟槽宽度的变化

Fig. 6 Variation of TE₀ mode with trench widths

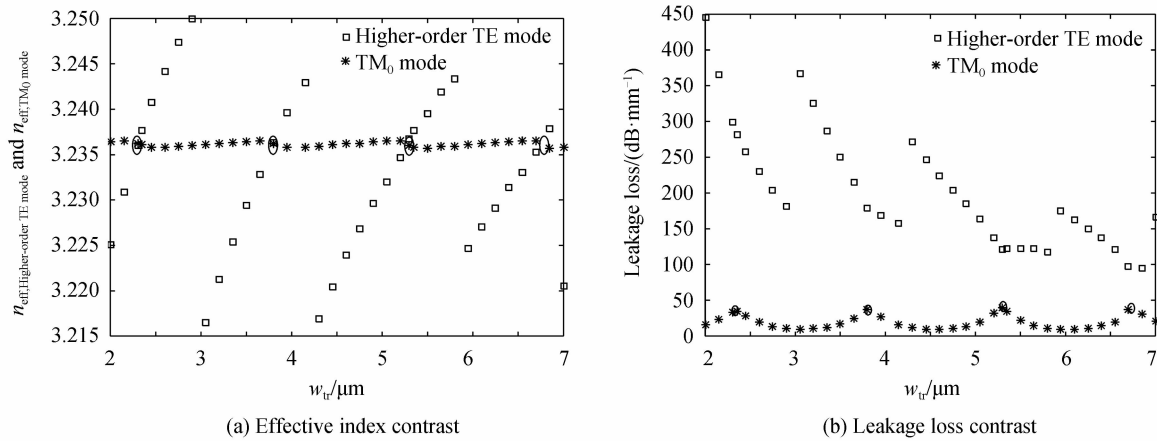


图 7 TE 高阶模与 TM₀ 的对比

Fig. 7 Contrast between higher-order TE mode and TM₀ mode

而对于 TE 高阶模与 TM₀ 模,其有效折射率与泄漏损耗随 w_{tr} 的变化会比较复杂,这是由于脊区边界处固有的 TM-TE 模式转化造成的.从图 7(a)可知, TM₀ 模有效折射率随 w_{tr} 的变化并不明显, TE 高阶模有效折射率则会周期性变化,并与 TM₀ 有效折射率有四个交点(图中用四个圆环标注).如图 7(b),在图 7(a)四个交点附近, TM-TE 模式转化将达到最大, TM₀ 的损耗会是最大值,即对应于 TM₀ 模损耗的四个谐振点,而 TE 高阶模损耗会有细微下降,但不明显,这是由于 TE 高阶模的损耗要远大于 TM₀ 模.

在谐振点位置, TM₀ 模与高阶 TE 模的有效折射率接近,它们的电场模式图也接近,可以将这两个模态看为简并态;在远离谐振点位置的时候, TM₀ 模与高阶 TE 模的有效折射率远离,它们的两个电场方向的模式图也会差别很大.如图 8 和图 9,选取沟槽宽度 w_{tr} 为 $5.3\mu\text{m}$ 和 $5.95\mu\text{m}$,分别为 TM₀ 模最大损耗点(谐振点)与最小损耗点.

图 8 和图 9 中两个沟槽宽度下波导的 TE₀ 模与普通波导一致,都是 E_x 分量占主, E_y 分量十分微弱.但是对于 TE 高阶模与 TM₀ 模,情况有些复杂,两个模式都有明显的杂化现象.图 8 中 TE 高阶模是脊区的 TM₀ 模与沟槽区的 TE₃ 模的混合,图 9 中 TE 高阶模是脊区的 TM₀ 模与沟槽区的 TE₄ 模的混合.不同的是,图 8 中 TE 高阶模与 TM₀ 模的模式图十分类似,即 E_x 与 E_y 都比较明显,此时 TM-TE 转化最大,从而 TM₀ 模侧向泄漏损耗最大;而图 9 中, TE 高阶模与 TM₀ 模的模式图差异较大, TE 高阶模的 E_y 中心明显, E_x 靠近中心较弱,远离中心较强,而 TM₀ 模 E_x 与 E_y 都比较明显,此时 TM-TE 转化最小,从而 TM₀ 模侧向泄漏损耗最小.

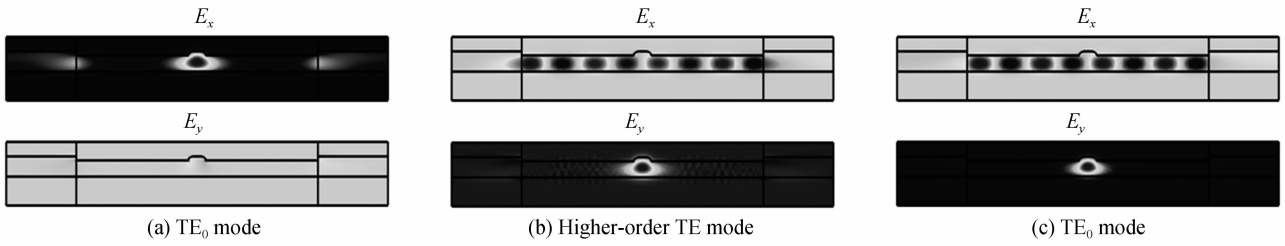


图 8 $w_{tr}=5.3 \mu\text{m}$ 时的电场模式图
Fig. 8 Mode profiles of electric fields when $w_{tr}=5.3 \mu\text{m}$

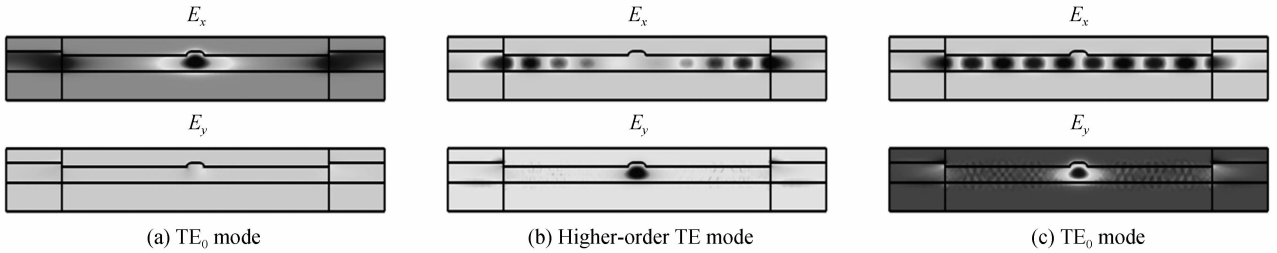


图 9 $w_{tr}=5.95 \mu\text{m}$ 时的电场模式图
Fig. 9 Mode profiles of electric fields when $w_{tr}=5.95 \mu\text{m}$

2.2 非矩形截面与普通矩形截面脊形波导的对比

图 10 展示了 $w_{arc}=240 \text{ nm}$ 时非矩形截面与普通截面脊形波导的 TE 高阶模和 TM_0 模损耗对比,可以把普通截面脊形波导看作是 $w_{arc}=0 \text{ nm}$ 时的非矩形截面的特殊情况,可以观察到,两个模式的损耗曲线发生了整体偏移,也就是谐振点发生偏移.

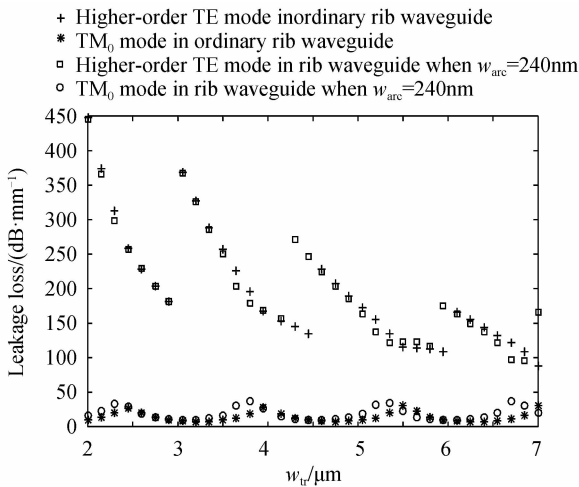


图 10 $w_{arc}=240 \text{ nm}$ 时脊形波导与普通脊形波导的 TE 高阶模与 TM_0 损耗对比

Fig. 10 Leakage losses contrast between rib waveguides with $w_{arc}=240 \text{ nm}$ and ordinary rib waveguides for higher-order TE mode and TM_0 mode

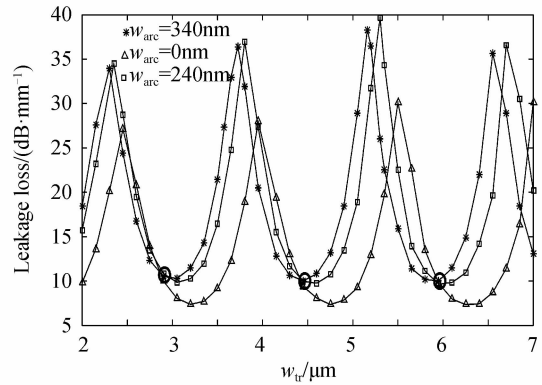


图 11 不同 w_{arc} 的三种波导 TM_0 模损耗随着沟槽宽度的变化

Fig. 11 Variation of leakage loss for TM_0 mode with trench widths in three waveguide with different w_{arc}

为了更加清晰地观察谐振点偏移状况,单独画出 TM_0 模的损耗图,图 11 展示了 $w_{arc}=0 \text{ nm}$ (普通脊形波导)、 $w_{arc}=240 \text{ nm}$ 、 $w_{arc}=340 \text{ nm}$ 非矩形截面脊形波导的 TM_0 损耗随着沟槽宽度的变化.可以观察到,谐振点的位置会随着 w_{arc} 的增大向左侧移动,最大损耗点的损耗值也会有变化,同时谐振周期也会发生相应变化.

当 w_{arc} 增大时,从仿真可知 $N_{\text{eff, TM-like}}$ 会减小,那么 $k_{r, \text{TM-like}}$ 也会减小,同时 $k_{x, \text{TE, clad}}$ 增大,由式(2)可知,此时谐振沟槽宽度 w_{tr} 由于分子变小分母增大而变小,这便解释了谐振点随着 w_{arc} 增大而左移的现象.至于谐振点损耗值的变化,可以解释为当 w_{arc} 变化时, TM-TE 转化强弱会不同,这个仍待进一步研究.

三种波导的 TM_0 损耗峰值(谐振点位置)和共振周期如表 1,其中周期理论值按式(3)来计算,三种类型波导的 $N_{\text{eff, TM-like}}$ 由仿真结果中的均值得到,分别为 3.239 3、3.236 1、3.234 1,而 $n_{\text{eff, TE, clad}}$ 的值由远截止近似

法得到,为 3.279 666 47. 从表 1 可以发现,谐振周期 $\Delta\omega_{tr}$ 的理论计算与仿真结果差异较小,平均相对误差为 0.56%. 相对于理论计算法,仿真不仅能得到谐振周期,而且更加容易得到谐振点位置.

表 1 谐振周期 $\Delta\omega_{tr}$

ω_{arc}/nm	Resonance point				Average value of $\Delta\omega_{tr}$	Theoretical $\Delta\omega_{tr}$	Relative error
	1	2	3	4			
0	2.45	3.95	5.5	/	1.525	1.510 782	0.94%
240	2.35	3.8	5.3	6.7	1.45	1.454 597	0.32%
340	2.3	3.725	5.16	6.55	1.416 7	1.422 535	0.41%

由此可知非矩形截面脊形波导的一个优势是可以通过改变脊形两顶角的圆弧来实现在沟槽宽度固定时的谐振点位置移动,从而实现对 TM_0 模损耗的调节,也就是说,当一个固定的普通脊形波导制作出来后,只需通过热氧法处理原普通脊形波导^[5]来改变截面圆弧就可以实现对 TM_0 模损耗的调节,而不需要通过多次制作不同沟槽来实现这一效果. 例如在沟槽宽度为 $5\ \mu m$ 时,普通脊形波导接近最低损耗,而 $\omega_{arc} = 340\ nm$ 非矩形截面脊形波导为最高损耗,处于中间的圆弧形状的损耗量位于二者损耗之间. 这也可以定性解释文献^[5]中截面波导截面经热氧处理后上顶角变为圆弧状后低损耗点加宽的现象,这种现象在文献^[5]中仅仅被解释为脊形边界处较弱的 TM - TE 转化,而从图 11 可以得到更加完善的解释. 当截面变为圆弧后,低损耗点的位置发生了左右偏移,由于热氧处理后形成的圆弧并不标准,如仿真中一样,谐振点在波导的一段发向左偏移,另一段产生向右偏移,从而叠加效果便变成了低损耗点的加宽.

图 11 中可以观察到有三个点是三条曲线的交点,即 ω_{tr} 取 2.9、4.45、5.95 μm ,图中用圆圈标记,当沟槽宽度选取这三个特殊值附近时, TM_0 损耗对于圆弧的变化不敏感, TM_0 损耗也比较小,在 10 dB/mm 左右. 选取其中一个点 $\omega_{tr} = 5.95\ \mu m$,对不同非矩形截面的 TM_0 损耗作图,同时与 $\omega_{tr} = 3.65\ \mu m$ 时的损耗图作对比,如图 12. 可以观察到,在 $\omega_{tr} = 3.65\ \mu m$ 时, TM_0 损耗随着 ω_{arc} 的增加而变化明显,在 $\omega_{arc} = 340\ nm$ 时达到最大损耗;而在 $\omega_{tr} = 5.95\ \mu m$ 时,损耗随着 ω_{arc} 的增加变化不大.

由此可知非矩形截面脊形波导的另一个优势为,当选取损耗曲线交点处宽度作为脊形波导的沟槽宽度时,波导损耗对脊形上顶角圆弧的改变不敏感,即当 ω_{arc} 变化时 TM_0 损耗一直会保持很低的水平,从而提高了制作容差.

2.3 沟槽刻蚀深度对非矩形截面脊形波导 TM_0 损耗的影响

固定非矩形截面脊形波导脊形的两上顶角圆弧形状,仅改变沟槽刻蚀深度,也就是改变沟槽区硅层厚度 t_2 时,来研究波导 TM_0 模的侧漏损耗,在此选定圆弧参量 $\omega_{arc} = 340\ nm$.

图 13 展示了当脊形截面固定为圆弧参量 $\omega_{arc} = 340\ nm$ 的非矩形截面时,不同沟槽区硅层厚度 (t_2) 下波导 TM_0 模的损耗对比,发现谐振点(最大损耗点)在 t_2 增加时向左侧偏移. 另外,当沟槽刻蚀深度减小时,也就是 t_2 增加时,波导 TM_0 模的整体损耗变小. 以最低损耗为例,当 $t_2 = 0.56\ \mu m$ 时,波导 TM_0

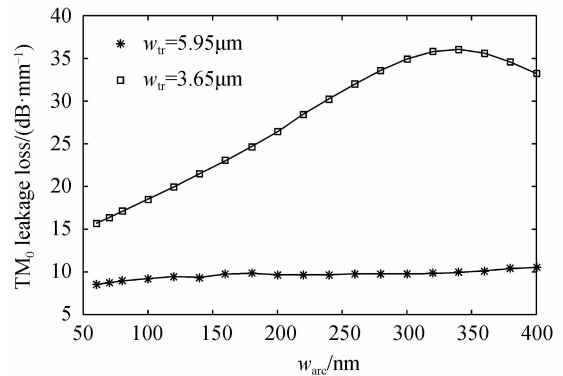


图 12 不同沟槽宽度的两种波导的 TM_0 模损耗随 ω_{arc} 的变化

Fig. 12 Variation of leakage loss for TM_0 mode with trench widths in two waveguides with different trench widths

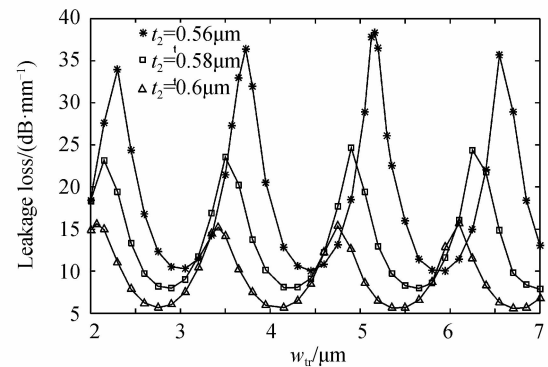


图 13 脊形截面固定为 $\omega_{arc} = 340\ nm$ 的非矩形截面时,不同 t_2 下波导 TM_0 模损耗随着沟槽宽度变化

Fig. 13 Variation of leakage loss for TM_0 mode with trench widths at different t_2 when the non-rectangular cross-section is $\omega_{arc} = 340\ nm$

模的损耗最低点平均值为10.12 dB/mm,当 $t_2=0.58\ \mu\text{m}$ 时,波导 TM_0 模的损耗最低点平均值为7.95 dB/mm,当 $t_2=0.6\ \mu\text{m}$ 时,波导 TM_0 模的损耗最低点平均值为5.63 dB/mm.

沟槽刻蚀深度对波导 TM_0 模的影响很大,本文中波导沟槽刻蚀深度 $h_r=0.2t_1$,为普通浅刻蚀波导($h_r=0.15t_1\sim 0.25t_1$)^[9],而文献[5,8,14]中脊形波导的刻蚀深度 $h_r=0.073t_1$,为极端浅刻蚀波导,其最低损耗可以低至0.087 dB/mm^[14].从图13中可以发现,当沟槽刻蚀深度减小时,波导 TM_0 模侧损确实有明显减小的现象,解释了两类波导损耗大小的差异.

3 结论

通过完美匹配层边界条件下的频域有限元法对波导截面进行模式分析,得到了非矩形截面脊形波导的有效折射率,通过其虚部得到损耗图,并且观察到类 TM_0 模的谐振现象.在此基础上,通过分析不同 ω_{arc} 的非矩形截面,观察到谐振点的偏移现象与谐振周期的变化,而这种周期变化与理论计算符合度很高,由此可得:1)在某些沟槽宽度的情况下,如 $\omega_{\text{tr}}=5\ \mu\text{m}$ 时,可以通过改变圆弧来实现类 TM_0 模损耗从最大到最小的调节;2)在另一些沟槽宽度的情况下,如 $\omega_{\text{tr}}=5.95\ \mu\text{m}$ 时,改变圆弧对类 TM_0 模损耗没有影响.这对实际制造浅刻蚀脊形波导有一定的意义,当制作准确度很高的时候,在适当的沟槽宽度下选择不同的圆弧来制作非矩形截面脊形波导,可以实现对类 TM_0 模损耗从最大到最小的调节,而不需要多次制作不同沟槽,从而简化了波导的加工;当制作准确度不高的时候,可以通过选择适当的沟槽宽度,使得非矩形截面对波导类 TM_0 模传输特性的影响降低,从而提高制作容差.文中关于这类非矩形截面SOI脊形波导的理论与仿真结论仍需要用实验来验证,另外,在制作这种波导时,仅仅用热氧法处理脊形波导获得的圆弧形状达不到准确度要求,如何精确制作圆弧截面将是下一步需要解决的问题.

参考文献

- [1] GOELL J. Rib waveguide for integrated optical circuits[J]. *Applied Optics*, 1973, **12**(12): 2797-2798.
- [2] PENG S, OLINER A. Leakage and resonance effects on strip waveguides for integrated optics[J]. *The Transactions of the IECE of Japan*, 1978, **61**(3): 151-153.
- [3] OLINER A, PENG S, HSU T, *et al.* Guidance and leakage properties of a class of open dielectric waveguides: part II—new physical effects[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1981, **29**(9): 855-869.
- [4] OGUSU K. Optical strip waveguide; a detailed analysis including leaky modes[J]. *Optical Society of America*, 1983, **73**(3): 353-357.
- [5] WEBSTER M, PAFCHEK R, MITCHELL A, *et al.* Width dependence of inherent TM-mode lateral leakage loss in silicon-on-insulator ridge waveguides[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, **19**(6): 429-431.
- [6] KOSHIBA M, KAKIHARA K, SAITOH K, *et al.* Reduced lateral leakage losses of TM-like modes in silicon-on-insulator ridge waveguides[J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(17): 2008-2010.
- [7] XU Xue-jun, CHEN Shao-wu, YU Jin-zhong, *et al.* An investigation of the mode characteristics of SOI submicron rib waveguides using the film mode matching method[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2009, **11**(1): 015508.
- [8] NGUYEN T, TUMMIDI R, KOCH T, *et al.* Rigorous modeling of lateral leakage loss in SOI thin-ridge waveguides and couplers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, **21**(7): 486-488.
- [9] DAI Dao-xin, WANG Zhi, JULIAN N, *et al.* Compact broadband polarizer based on shallowly-etched silicon-on-insulator ridge optical waveguides[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(26): 27404-27415.
- [10] AKO T, BEECKMAN J, BOGAERTS W, *et al.* Tuning the lateral leakage loss of TM-like modes in shallow-etched waveguides using liquid crystals[J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(2): 214-220.
- [11] AKO T, HOPE A, NGUYEN T, *et al.* Electrically tuneable lateral leakage loss in liquid crystal clad shallow-etched silicon waveguides[J]. *Optical Society of America*, 2015, **23**(3): 2846-2856.
- [12] KYEGO K, NGUYEN T, MITCHELL A. Evanescent wave sensors utilizing laterally radiating thin-ridge silicon-on-insulator waveguide tapers[C]. *IEEE*, 2014: 577-579.
- [13] HOPE A, NGUYEN T, BOGAERTS W, *et al.* Experimental demonstration of TM lateral leakage in a standard SOI photonics platform[C]. *IEEE*, 2014: 77-78.
- [14] HOPE A, NGUYEN T, MITCHELL A, *et al.* Quantitative analysis of TM lateral leakage in foundry fabricated silicon rib waveguides[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, **28**(4): 493-496.
- [15] HUANG Hui, LIU Ke, QI Bing, *et al.* Re-analysis of single-mode conditions for silicon rib waveguides at 1550 nm wavelength [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, **34**(16): 3811-3817.