

文章编号: 0253-2239(2001)05-0556-03

SOI 及 GeSi/Si 脊形光波导的模式与波导几何结构*

魏红振¹⁾ 余金中¹⁾ 张小峰¹⁾ 韩伟华¹⁾ 刘忠立¹⁾ 王启明¹⁾ 史伟²⁾ 房昌水²⁾

(1), 中国科学院半导体研究所集成光电子实验室, 北京 100083)
(2), 山东大学晶体材料国家重点实验室, 济南 250100

摘要: 用有效折射率方法对 SOI(绝缘体上硅)及 GeSi/Si 脊形光波导的单模条件进行了模拟, 与 Soref 的单模条件进行了比较, 将两者与实验结果进行了比较, 得到了与实验结果符合非常好的单模条件。同时对多模波导进行了模拟, 得到了波导承载一阶和二阶模的条件。

关键词: 集成光学; 脊形光波导; 光波导理论

中图分类号: TN256 文献标识码: A

1 引 言

脊形波导是集成光学中一种重要的结构, 它是其它有源和无源器件的基础。SOI 是微电子中的一种重要的材料, 同时也是硅基集成光电子的一种重要材料。是硅基集成光电子器件如硅基光开关、探测器^[1-4]等的基础。然而 Si 的折射率比 SiO₂ 的大得多, 要在 SOI 平板波导结构中传导基模光波, 波导层的厚度应小于 0.2 μm, 而标准的单模光纤的芯区直径大于 8 μm, 这就使光纤和波导的耦合效率极低。二维脊形光波导引入水平方向的小的折射率差, 可以实现大截面尺寸波导的单模传输, 截面尺寸可与单模光纤的芯径相匹配, 这样就大大地提高了波导与光纤的耦合效率。

集成光学中, 设计脊形波导时首先要考虑脊形波导的单模条件。由于三维波导的本征方程的解不能用解析表达式表示, 目前主要用近似方法求解本征方程的数值解。Soref 用近似方法研究了 SOI 和 GeSi/Si 脊形波导的单模条件。脊形波导的结构如图 1 所示, Soref 的单模条件为^[5]:

$$t \leq 0.3 + \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \quad (r > 0.5), \quad (1)$$

其中 $t = w/H$, $r = h/H$, w , H 和 h 分别为脊形波导的脊宽、内脊高和外脊高。 t 的取值一般在 1 附近。在强限制波导条件下, Soref 的单模条件与实验结果的最大误差接近 30%, 此时如果波导的厚度 H 为 10 μm, 由此产生的脊宽 w 的设计误差达到 3 μm,

这就给单模脊形波导的设计带来误差。由于波导加工中不容易控制脊宽 w 和脊深的精度, 因此要求以比较精确的单模条件为基础, 设计加工参数, 放宽加工容限。为此需要给出精度更高的单模条件。本文采用有效折射率方法(EIM)求解三维脊形波导的本征方程, 得到了脊形波导的单模条件, 与实验结果完全一致。

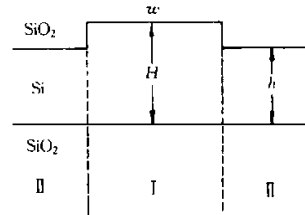


Fig. 1 Structure of SOI rib waveguides

除了单模脊形波导外, 多模脊形波导在集成光学中也有重要的应用, 其中重要的一种是多模干涉, 可以用作变分比分束器、模转换与混合器以及多模马赫-曾德尔干涉仪^[6-7]。本文也采用有效折射率方法研究了脊形波导的多模特性与波导几何结构的关系。

2 有效折射率方法与单模条件

有效折射率方法(EIM)是求解三维波导本征方程的一种最简单的近似方法。这种方法在外脊平板波导接近截止时准确度大大降低, 尤其当外脊平板波导模截止时已不能用这种方法进行计算。但这种方法在远离模截止区时具有很好的精度, 且计算机耗时很少。考虑到脊形波导大尺寸远离模截止区的

* 国家自然科学基金(69896260, 69990540)资助项目。

收稿日期: 1999-11-09; 收到修改稿日期: 2000-03-13

特点,对于浅脊波导($r > 0.5$),有效折射率方法依然是一种有效的计算方法。

对于图1所示的脊形波导,有效折射率方法首先分别考虑I区和II区的三层平板波导,计算其有效折射率 n_1 和 n_2 ,然后考虑以 n_1 为波导层、以 n_2 为限制层、以脊宽 w 为波导层厚度的三层对称平板波导,其模有效折射率即为波导的有效折射率。由有效折射率的计算方法可以看到有效折射率方法并不要求单模脊形波导在垂直方向为单模。事实上,由于波导厚度大,在垂直方向上必然存在许多模式。但是在水平方向上,由于I区和II区波导厚度不同使得两者的有效折射率有一定的差值,差值的大小主要由 r 的大小决定,一般比较小。这样对于水平方向的三层波导 n_2, n_1, n_2 ,由于 n_1 和 n_2 相差较小,只要 w 小于一定的值,则水平方向只能承载单模,此时在垂直方向上的高阶模的能量耦合到基模中,脊形波导只能承载单模。

由于单模脊形波导垂直方向的高阶模的能量向外脊基模耦合,可以认为在单模波导中所有高阶模的模有效折射率小于外脊单模的模有效折射率,即脊形波导要承载单模,要求一阶模的模有效折射率小于外脊基模的模有效折射率,这就是脊形波导的单模判据。

图2为SOI脊形波导几何结构尺寸决定的单模条件的计算曲线,图中同时给出了Soref的单模曲线。图中所示的为波导参数 w, H, h 对波导模式的影响,以 w/H 为 h/H 的函数形式来表示。对模拟结果进行拟合得到改进的SOI脊形波导的单模条件为:

$$t \leq \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} + \frac{0.15r^3}{\sqrt{1-r^2}}, \quad (2)$$

式中 t, r 的定义与上面相同。考虑到近似计算的精度,取 $r > 0.5$ 。

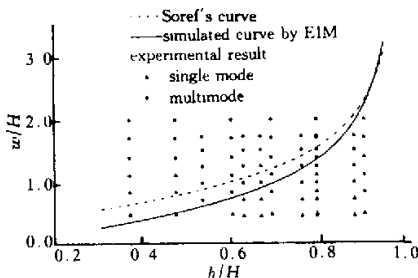


Fig. 2 Single mode condition for rib waveguides

人们对脊形波导已作了大量的实验研究,尽管

没有依据实验结果的脊形波导的单模判据,但是人们作了大量的关于SOI波导模式与波导结构的实验^[8,9],其中Rickman等人获得了大量的波导模式与波导结构的关系的实验结果。在图2中也给出了这些实验研究的结果。由图可见,当 r 较小时,Soref的结论与实验结果有较大的误差,如果考虑到实验数据的不连续性,这种误差可能增大。从图2同样可以看到,采用有效折射率方法模拟的结果与Rickman的实验结果符合得非常好,而Soref的结论只是在 r 较大时与实验相符,由此说明采用有效折射率方法得到的脊形波导的单模条件更精确。

SiGe/Si脊形波导的模特性与SOI波导类似。图3中实线表示为用有效折射率方法对SOI脊形波导模拟的单模条件,虚线为同样方法得到的Ge组份为0.25的GeSi/Si脊形波导的单模条件。可以看到两条曲线几乎完全重合。因此对SOI波导拟合得到的单模条件(2)式同样适合于GeSi/Si光波导。

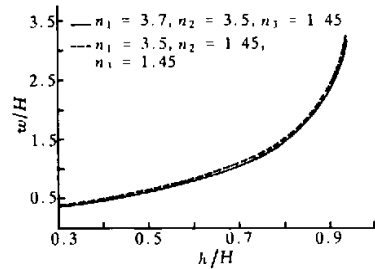


Fig. 3 Single mode condition for SOI and GeSi/Si rib waveguides. ----: SOI rib waveguides
—: GeSi/Si rib waveguides

3 多模特性与波导结构

类似于单模判据,波导承载一阶模时,波导的二阶模的能量耦合到外脊的低阶模中,此时二阶模的模有效折射率小于外脊平板波导一阶模的有效折射率。同样对于二阶模波导,波导的三阶模有效折射率小于外脊的二阶模的模有效折射率。以此为判据,采用有效折射率方法求解本征方程,我们得到了多模波导承载一阶模和二阶模时波导结构参数的临界条件。图4为单模、一阶模和二阶模脊形波导的结构参数应满足的条件。对计算结果进行拟合,一阶模脊形波导的几何结构应满足:

$$t \leq 0.25 + \frac{1.1r}{\sqrt{1-r^2}} + \frac{1.05r^2}{\sqrt{1-r^2}}. \quad (3)$$

同样,二阶模的脊形波导的几何结构应满足:

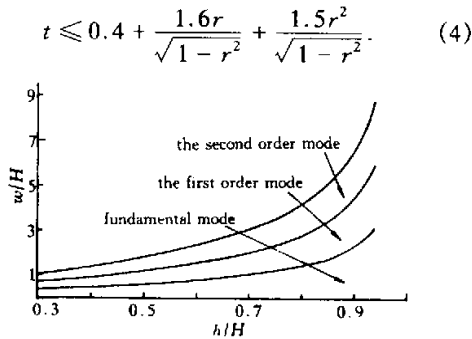


Fig. 4 Condition for multimode rib waveguides loading the fundamental mode, the first order mode and the second order mode

结论 通过有效折射率法对 SOI 和 GeSi/Si 脊形波导模式进行模拟,得到了脊形波导的单模条件,如(2)式所示。将此单模条件及 Soref 的单模条件与 Rickman 的实验结果进行了比较,发现采用有效折射率法得到的单模条件与实验结果完全一致,这样,改进了 Soref 的单模条件,大大减小了单模波导的设计误差。

同样采用有效折射率方法对多模脊形波导进行了模拟,得到了承载一阶模和二阶模时波导的几何结构应满足的条件。

Geometric Structures and Modes of SOI and GeSi/Si Rib Optical Waveguides

Wei Hongzhen Yu Jinzhong Zhang Xiaofeng Han Weihua Liu Zhongli Wang Qiming
(State Key Laboratory of Integrated optoelectronics, Institute of Semiconductors,
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

Shi Wei Fang Changshui

(State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100)

(Received 9 November 1999; revised 13 March 2000)

Abstract: Comparisons of single mode waveguide conditions for single mode silicon-on-insulator (SOI) and GeSi/Si rib waveguides obtained by the effective index method (EIM) and proposed by Soref *et al.* with the experimental result are carried out. It is found that single mode waveguide condition obtained by effective index method is in good agreement with Rickman's experimental result. Conditions for multimode rib waveguides loading the first and the second order mode are also obtained by effective index method.

Key words: integrated optics; rib waveguide; optical waveguide theory

参 考 文 献

- [1] Zhao G Z, Chen A H, Liu E K *et al.*. Silicon-on-insulator asymmetric optical switch based on total internal reflection. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 1997, **9**(8):1113~1115
- [2] Zhao C Z, Li G Z, Liu E K *et al.*. Silicon on insulator Mach-Zehnder waveguide interferometers operating at 1.3 μm . *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(17):2448~2449
- [3] Jalali B, Yegnanarayanan S, Yoon T *et al.*. Advanced in silicon-on-insulator optoelectronics. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, 1998, **4**(6):938~946
- [4] Soref R A. Silicon-based optoelectronics. *Proc. of IEEE*, 1993, **81**(12):1687~1706
- [5] Soref R A, Schmidtchen J, Petermann K. Large single-mode rib waveguides in GeSi/Si and Si-on-SiO₂. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, **QE-27**(8):1971~1973
- [6] Fardad M A, Fallahi M. Sol-gel multimode interference power splitters. *IEEE Photon. Lett.*, 1999, **11**(6):697~699
- [7] Lagali N S, Paiam M R, Macdonld R I. Theory of variable-ratio power splitter using multimode interference couplers. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 1999, **11**(6):665~667
- [8] Rickman A G, Reed G T, Namavar F. Silicon-on-insulator optical rib waveguide loss and mode characteristic. *J. Lightwave Tech.*, 1994, **12**(10):1771~1776
- [9] Schmidtchen J, Splett A, Schüppert B *et al.*. Low-loss single mode optical waveguides with large cross section in silicon-on-insulator. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(16):1486~1487