

# SOI 纳米线波导导光机理的物理分析<sup>\*</sup>

李运涛<sup>1,†</sup> 徐学俊<sup>1,2,††</sup> 黄庆忠<sup>1,3,†††</sup> 俞育德<sup>1</sup> 余金中<sup>1</sup>

(1 中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点实验室 北京 100083)

(2 东京都市大学综合研究所 硅纳米科学研究中心 东京 158-0082 日本)

(3 华中科技大学武汉光电国家实验室(筹) 武汉 430074)

**摘要** SOI(silicon-on-insulator)纳米线波导及其器件是近年来光电子学领域研究的重点内容之一. 文章从基本的导波光学理论出发,引入古斯-汉森位移理论,对 SOI 纳米线波导导光的物理机制进行了分析并给出了物理解释和模拟结果.

**关键词** 绝缘体上的硅,纳米线波导,古斯-汉森位移

## The physics of silicon-on-insulator nanowire waveguides

LI Yun-Tao<sup>1,†</sup> XU Xue-Jun<sup>1,2,††</sup> HUANG Qing-Zhong<sup>1,3,†††</sup> YU Yu-De<sup>1</sup> YU Jin-Zhong<sup>1</sup>

(1 State Key laboratory of Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductor, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(2 Tokyo City University, Tokyo 158-0082, Japan)

(3 Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract** Nanowire waveguides and devices have become a key point of optoelectronics in recent years. In this paper, the physics of silicon-on-insulator nanowire waveguides is analyzed and explained based on the Goos-Hänchen displacement theory. Simulation results are also presented.

**Keywords** silicon-on-insulator, nanowire waveguide, Goos-Hänchen displacement

## 1 引言

随着光子集成电路和光互连技术的发展,SOI 纳米线波导被越来越多的公司及研究机构所采用,并被认为是未来三年实现光互连的最理想平台<sup>[1-5]</sup>. SOI 纳米线波导具有对光场限制作用强、传输损耗低、集成度高的优势,不仅可以大大提高光子芯片的工作频率和效率,还能有效缩小芯片的长度和面积,降低器件功耗. 基于 SOI 纳米线波导的光调制器、互连芯片、慢光器件等各种光电子器件已经屡见不鲜,然而,对于 SOI 纳米线波导导光的物理机制的研究,仍在继续深入<sup>[1-4]</sup>.

在 SOI 材料系统中,Si/SiO<sub>2</sub> 和 Si/空气具有很大的折射率差,由此形成的波导(比如硅光子线波导和亚微米尺寸脊型波导)对在其中传输的光场有很

强的限制作用,甚至在亚微米尺寸下也能对光产生导波的作用. 然而,在光通信波段,半导体材料硅中的光波长仅仅只有 500nm 左右,此时波导尺寸已经接近甚至小于硅中的光波长,通常需要严格求解麦克斯韦(Maxwell)方程组才能得到波导中光的传输情况,此方面的研究已经广泛开展. 本文从导波光学平板波导的基本理论出发,从理论上推导出平板波导的导波模式与折射率差之间的关系,进而计算出 SOI 纳米线波导的高度限制,然后引入了古斯-汉

<sup>\*</sup> 国家重点基础研究发展计划(批准号:2006CB302803; 2011CB301701)、国家自然科学基金青年基金(批准号:61007033)资助项目

2011-09-30 收到

<sup>†</sup> Email: ytli@semi.ac.cn

<sup>††</sup> Email: xxu@tcu.ac.jp

<sup>†††</sup> Email: huangqz@mail.hust.edu.cn

森位移理论,利用射线光学的方法,分析了 SOI 亚波长光波导中光的传输情况,对 SOI 纳米线波导导光的物理机制进行了解释.

## 2 理论分析

图 1 所示的三层平板波导结构是目前 SOI 纳米线波导分析中广泛采用的模型之一.若芯层材料的折射率为  $n_1$ ,衬底和覆盖层的折射率分别为  $n_0$  和  $n_2$ ,且  $n_1 > n_0 > n_2$ .波导层-衬底界面上的全反射角为  $\theta_s$ ,波导层-覆盖层界面上的全反射角为  $\theta_c$ .则当入射角  $\theta > \theta_s > \theta_c$  时,光被限制在波导层中传播,形成导模<sup>[5]</sup>.

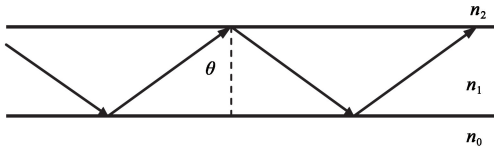


图 1 三层平板波导结构示意图

根据导波光学理论,可以得到平板波导中的导模模式本征方程为<sup>[6]</sup>:

对 TE 模而言,

$$(n_1^2 - N^2)^{1/2} k_0 d = m\pi + \arctan\left(\frac{N^2 - n_0^2}{n_1^2 - N^2}\right)^{1/2} + \arctan\left(\frac{N^2 - n_2^2}{n_1^2 - N^2}\right)^{1/2}; \quad (1)$$

对 TM 模而言,

$$(n_1^2 - N^2)^{1/2} k_0 d = m\pi + \arctan\left[\frac{n_1^2}{n_0^2} \left(\frac{N^2 - n_0^2}{n_1^2 - N^2}\right)^{1/2}\right] + \arctan\left[\frac{n_1^2}{n_2^2} \left(\frac{N^2 - n_2^2}{n_1^2 - N^2}\right)^{1/2}\right]. \quad (2)$$

式中  $d$  为芯层的厚度,  $k_0$  为真空中的波数,  $N$  为  $m$  阶( $m=1, 2, 3, \dots$ )导模模式的有效折射率.

在 SOI 纳米线波导中,波导芯层为硅材料,衬底和覆盖层均为二氧化硅,因此  $n_0 = n_2$ . 这就保证光在波导中单模传输,即  $m=1$ . 将  $n_1 = n_{\text{Si}} = 3.444$ ,  $n_0 = n_2 = n_{\text{SiO}_2} = 1.46$  代入公式,可以得到单模传输的波导厚度  $h = 245\text{nm}$ ,其远小于硅材料中光波的波长.正是 SOI 材料的大折射率差保证了光波能在厚度仅为其波长一半的纳米线波导中传输.

为了进一步解释光波在尺寸小于其波长的波导内传输的机理,分析光在波导中的传输情况,我们利用射线光学方法分析如图 2 所示的 SOI 三层平板波导.

当一束光以大于全内反射临界角的入射角进入波导中时,在波导的两个界面处会形成全内反射,光

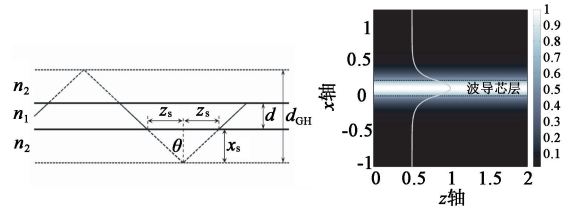


图 2 (a)  $\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{SiO}_2$  平板波导及光线在波导中的传播路径; (b) 利用波动光学方法求解 Maxwell 方程组得到的平板波导中传输的光场分布

束就会以之字形在波导中向前传播.由于界面处折射率的不连续,入射光在界面处的入射点和反射光的反射点不是在同一位置,而是有一个相对的位移,即古斯-汉森位移  $z_s$ ,如图 2 中所示.这就相当于反射点向外移动了一定的距离,也就是说,波导中实际的导光层的厚度  $d_{\text{GH}}$  比 Si 层厚度  $d$  大.这一点可以从图 2(b)所示的利用波动光学求解 Maxwell 方程组得到的光场分布得到验证:光沿着波导传输时,能量并不是完全集中在芯层内,而是有一部分以倏逝波的形式在覆盖层中传输.

根据波动光学的理论,能在波导中传输的光束的入射角不再是连续变化的角度,而是有一系列离散的角度值,对应于基模的入射角  $\theta$  满足如下关系:

$$\sin\theta = N/n_1. \quad (3)$$

图 2 中所示的古斯-汉森位移  $z_s$  可以由下式给出<sup>[6]</sup>:

对 TE 模而言,

$$z_s = (N^2 - n_2^2)^{-1/2} \tan\theta; \quad (4)$$

对 TM 模而言,

$$z_s = \frac{(n_{\text{eff}}^2 - n_2^2)^{-1/2} \tan\theta}{n_{\text{eff}}^2/n_1^2 + n_{\text{eff}}^2/n_2^2 - 1}. \quad (5)$$

其中  $n_{\text{eff}}$  为有效折射率.由此我们可以得到由于古斯-汉森位移造成的波导层展宽为

$$x_s = z_s / \tan\theta. \quad (6)$$

图 3 中给出了 TE 模和 TM 模偏振下实际导光层厚度  $d_{\text{GH}}$  与波导芯层厚度  $d$  的关系.可以看出,随着波导层厚度的减小和增大,实际导光层的厚度都会增大,并在某一厚度处达到最小值.无论是 TE 还是 TM 模,这个最小导光层厚度都大于光波在硅中的波长,尤其是 TE 模,始终大于  $1\mu\text{m}$ .更值得指出的是,波导厚度的展宽量和波导的折射率差有直接关系,折射率差越大,展宽量越大.因此,可以认为,正是由于有着较大的折射率差,才使得 SOI 波导的尺寸能够降低到亚波长的量级.

当入射光线在弯曲界面发生全反射时,不仅反射点会沿着弯曲界面有一定的位移,反射角也会与

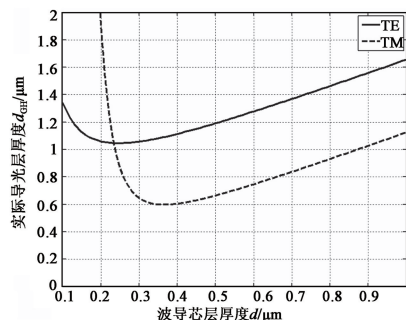


图3 不同波导宽度下由古斯-汉森位移造成的波导展宽

入射角不同,具体的改变量与入射角、弯曲半径、界面两边的折射率差都有关系<sup>[7-9]</sup>.下面我们仍然以二维 SiO<sub>2</sub>/Si/SiO<sub>2</sub> 平板波导为例来加以说明.一束光在弯曲平板波导中的传播轨迹如图4所示.当入射光束的位置  $x_0$  不同时,在弯曲界面上的入射角也不同,如果弯曲半径过小,这个入射角就有可能小于全反射临界角,从而导致弯曲波导的辐射损耗.同样,由于古斯-汉森位移的存在,光束在弯曲波导中的反射次数将会降低.

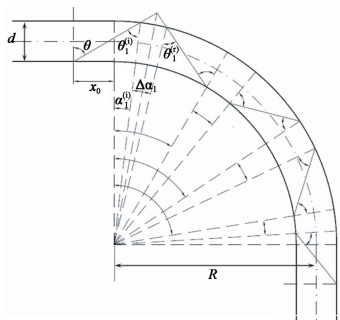


图4 光线在二维 SiO<sub>2</sub>/Si/SiO<sub>2</sub> 弯曲平板波导中的传播轨迹

图5中分别给出了不同弯曲半径下入射光束在弯曲波导中第一次反射的入射角和古斯-汉森角位移与入射位置的关系.可以看出,弯曲半径越小,入射角小于全反射临界角的区域越多,因此辐射损耗也就越大,同时,古斯-汉森角位移也会增大,光在波导中的反射次数就会越来越少.

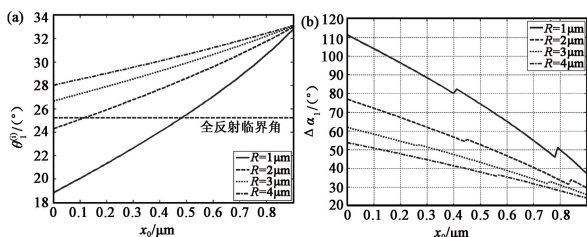


图5 不同弯曲半径下,入射光束在弯曲波导中(a)第一次反射的入射角  $\theta_1^{(0)}$  和(b)古斯-汉森角位移  $\Delta\alpha_1$  与入射位置  $x_0$  的关系

与直波导中的情况类似,由于古斯-汉森角位移的存在,弯曲波导的半径实际上也有所增大.图6中给出了不同弯曲半径  $R$  和不同折射率差 ( $n_1/n_2$ ) 下的实际半径  $R_{GH}$  与入射光束的位置  $x_0$  的关系.可以看到,实际弯曲半径随着折射率差的增大而显著增大,对于 SOI 材料弯曲波导来说,弯曲半径甚至有十几倍的增大,因此,数微米半径的弯曲波导仍然能够实现很小的辐射损耗.

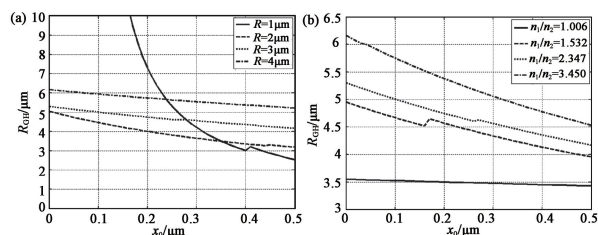


图6 (a)不同弯曲半径  $R$  和(b)不同折射率差 ( $n_1/n_2$ ) 下的实际半径  $R_{GH}$  与入射光束的位置  $x_0$  的关系

### 3 结束语

本文从导波光学基本理论出发,计算了 SOI 纳米线波导导光的物理尺寸,并分析了古斯-汉森位移对 SOI 纳米线直波导和弯曲波导的展宽和辐射损耗.分析表明,对于 SOI 纳米线波导,由于其大折射率差所造成的古斯-汉森位移展宽,使其实际波导尺寸均大于光波在纳米线波导中的波长,从而对光形成强限制,使得光波能够在波导中低损耗传输.

### 参考文献

- [1] Liu A S, Jones R, Liao L *et al.* Nature, 2004, 427: 615
- [2] Rong H S, Liu A S, Jones R *et al.* Nature, 2005, 433: 292
- [3] Dumon P, Bogaerts W, Wiaux V *et al.* IEEE Photon. Technol. Lett., 2004, 16(5): 1328
- [4] 徐学俊, 余金中, 陈少武. 半导体光电, 2007, 28: 5 [Xu X J, Yu J Z, Chen S W. Semiconductor Optoelectronics, 2007, 28: 5]
- [5] Yamada K, Tsuchizawa T, Watanabe T *et al.* IEICE Trans. Electron., 2004, E87-C(3): 351
- [6] 曹庄琪. 导波光学. 北京: 科学出版社, 2007
- [7] Fieldler-Ferrari N, Nussenzeig H M, Wiscombe W J. Phys. Rev. A, 1991, 43(2): 1005
- [8] Tran N H, Dutriaux L, Balcou P *et al.* Opt. Lett., 1995, 20(11): 1233
- [9] Schomerus H, Hentschel M. Phys. Rev. Lett., 2006, 96: 243903