

硅基微纳光波导损耗特性的表征技术

陈少武 徐学俊 屠晓光

(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)

摘要 微纳光波导的基本功能是实现光波的低损耗传输,是芯片光互连的基础,其传输损耗是评价微纳光波导加工质量和传输性能的基本指标。微纳光波导由于其尺寸比常规光波导小 1~2 个数量级,光耦合的难度和不确定性都很大,造成传输损耗的测量相对困难。探讨了可用于微纳光波导传输损耗测试表征的几种方法,包括截断法、法布里-珀罗(Fabry-Pérot, F-P)腔谐振谱条纹对比度分析法、傅里叶(Fourier)变换法等,对上述方法在测试精度、适用条件方面进行了分析对比。研究表明,截断法受光纤耦合不确定性的影响测量误差较大;F-P 腔谐振谱条纹对比度分析法能够消除光纤耦合不确定带来的误差,但是只能测量单一 F-P 谐振腔的波导结构,无法测量复杂的多腔结构;傅里叶变换法能够消除波导和光纤耦合状态的不固定带来的误差,并通过相邻峰位的比值来提取出波导的传输损耗。

关键词 集成光学; 光子线波导; 传输损耗测量; 截断法; 谐振腔分析法; 傅里叶变换法

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS200929s1.0134

Propagation Losses Measurement Methods for Silicon Based Micro-Nano Waveguides

Chen Shaowu Xu Xuejun Tu Xiaoguang

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract The micro-nano sized waveguides are the basic building blocks for on-chip interconnects, and their basic function is to transmit light with low loss. The propagation loss is one of the indexes to evaluate the fabrication quality and performance of micro-nano sized waveguides. With cross section size one or two orders smaller than that of conventional waveguides, and due to the large uncertainty and the difficulty of light coupling, the propagation loss measurement is comparatively difficult to perform. This paper discussed several propagation loss measurement methods suitable for micro-nano sized waveguides, including cut-back method, Fabry-Pérot cavity interference fringe contrast ratio method, and Fourier transform method, etc. The analysis and comparison on the above mentioned methods in terms of measurement accuracy and applicability was given, that is, the cut-back method is liable to the uncertainty of light coupling with comparatively large error, the Fabry-Pérot cavity interference fringe contrast ratio method is immune to the uncertainty of light coupling, but only applicable to the case of single F-P cavity, the Fourier transform method is not only immune to the uncertainty of light coupling, but also applicable to the case of multi-cavity.

Key words integrated optics; photonic wire waveguide; propagation loss measurement methods; cut-back method; Fabry-Pérot cavity interference fringe contrast ratio method; Fourier transform method

1 引言

硅基光电子/光子集成技术是光互连、光计算、光传感和光信息处理的关键性支撑技术,绝缘体上硅(Silicon-on-insulator, SOI)材料是性能优异的光

电子集成平台,是实现硅基光电子/光子集成的最佳选择。SOI 微纳光波导是光子集成芯片中的最基本结构,是进一步构成其他无源/有源光子/光电子器件,例如分束/合束器、阵列波导光栅(AWG)复用/

基金项目: 国家自然科学基金(60577044, 60877013, 60837001)、国家 863 计划(2006AA032424)和国家 973 计划(2007CB613405)资助课题。

作者简介: 陈少武(1968—),男,博士,研究员,主要从事硅基光子学和光互连等方面的研究。

E-mail: swchen@semi.ac.cn

解复用器、马赫-曾德尔(MZI)干涉仪、微环谐振腔、调制器、光开关等的基本构成单元。SOI 微纳光波导主要包括两种形式：一种是被称为“光子线”(Photonic wire)的条形或脊形波导；另一种是光子晶体线缺陷波导，主要在二维光子晶体平板上实现。还有一种是近两年出现的狭缝波导(Slot 波导)。SOI 微纳光波导的基本功能是实现光波的低损耗、低畸变传输，其传输损耗是最基本最重要的评价指标。SOI 微纳光波导的光传输损耗机制主要包括：1) 波导粗糙侧壁或光子晶体空气孔的光散射；2) 波导衬底光泄漏损耗；3) 波导材料吸收损耗；4) 波导弯曲辐射损耗。SOI 微纳光波导传输损耗的测量对于评价波导的加工质量、定量分析损耗的起源都具有重要意义。测量波导传输损耗的方法多种多样，有截断法^[1]、法布里-珀罗(F-P)谐振腔干涉条纹对比度分析法^[2,3]、傅里叶变换法^[4~6]、多次反射法^[7,8]、波导侧向散射光收集法^[9,10]、棱镜耦合法^[11]等，目前常用的方法是截断法、F-P 谐振腔干涉条纹对比度分析法、傅里叶变换法^[12]，其他方法由于测试精度欠佳或实验装置复杂而极少被采用。鉴于微纳光波导传输损耗的重要性，对其测量方法进行探讨是必要的。

2 传输损耗测试方法

2.1 截断法

截断法是直接从光纤传输损耗测量方法“移植”到光波导上的。在光纤传输损耗测量时，先测出一段光纤的输出光功率，再把光纤截断，测出截断后剩余光纤的输出光功率，从先后测得的光功率数值中就可提取出光纤的传输损耗。由于光纤的长度可以足够长，专用的光纤切割刀能够很方便地获得呈镜面的断面，因此截断法对于光纤传输损耗测试是很

方便很精确的。然而，截断法用于测试光波导传输损耗时，并不是真的把光波导芯片截断，而是分别测量同一芯片上不同长度的光波导的输出光功率，从而提取出传输损耗。如图 1(a)所示，为了测量出中心区微纳光子线波导的传输损耗，需要制作一系列不同长度 L_{PW} 的光子线波导，这些波导具有相同的渐变结构，渐变部分长度为 L_{tap} ，余下的部分是宽波导，其长度为 L_{bw} 。宽波导的传输损耗相对于光子线波导可以忽略，这是截断法采用的第一个近似条件。另一个近似条件是假设光纤与每根波导的耦合情况完全相同。对每一根光波导测量透射率可以表示为 $T = P_{output} / P_{input}$ 。以光子线波导长度为横轴，以不同长度光子线波导测得透射率(以 dB 表示)纵轴，利用得到的数据点线性拟合出透射率随光子线长度的变化关系曲线，曲线的斜率就代表光子线波导的传输损耗，曲线在纵轴上的截距就是光纤一波导耦合总损耗(包括端面反射、散射、光场模式失配等)。利用这种方法要想得到准确结果的前提是宽波导的传输损耗必须远远小于光子线波导的传输损耗，而且光纤与不同波导之间的耦合情况必须完全一致。但是在实际测试中，光纤与不同波导之间的耦合总会稍有偏差；另外，光波导前后端面反射造成的 F-P 谐振效应也会在不同长度光波导透射光功率上引起随机涨落(取决于波导长度和测试波长)。受以上因素的共同影响，此方法测量得到的结果往往误差较大。图 1(b)是用截断法测试 SOI 微纳光波导传输损耗的实验结果，所测光波导的厚度为 340 nm，宽度为 350 nm，芯片两端的宽波导宽度为 10 μm ，但厚度仍为 340 nm。测量得到的传输损耗为 1.656 dB/mm。从测试结果看，各实验数据点偏离拟合直线的程度较大，说明各次测量时的偶然误差较大。

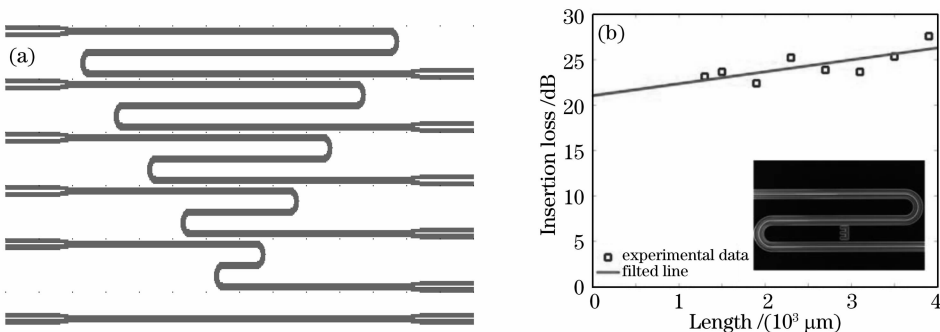
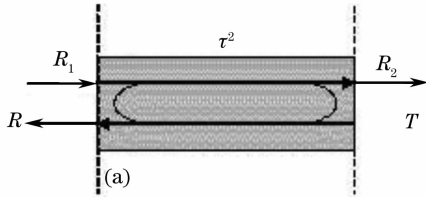


图 1 截断法测量光波导损耗原理图。(a) 不同长度的光波导；(b) 测量结果

Fig. 1 Cut-back method. (a) waveguides with different length; (b) measurement result

2.2 F-P 腔干涉条纹对比度分析法

波导在制作完毕后,要对波导端面进行解理和抛光,用来减小波导端面粗糙带来的端面散射损耗。这两个解理面正好形成了一个 F-P 腔,如图 2(a)所示,前后端面的反射率为 R_1 和 R_2 ,腔内总损耗为



τ^2 。光波在此 F-P 腔内部多次往返传播干涉后,光波导的透射光谱就会呈现如图 2(b)所示的周期性干涉条纹(示意图)。通过对此透射光谱干涉条纹对比度的测量,就可提取出波导的传输损耗 τ^2 [2,3]。

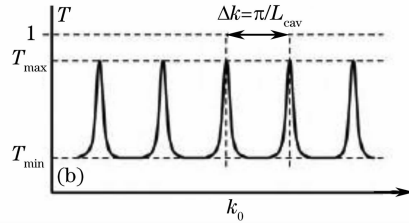


图 2 F-P 腔干涉条纹对比度分析法。(a) F-P 腔内光的传输;(b) F-P 腔透射光谱干涉条纹示意图

Fig. 2 F-P cavity method using fringe contrast. (a) light propagation in F-P cavity; (b) interference fringe in spectrum of F-P cavity

由多光束干涉理论可知,F-P 腔的透射光谱可表示为

$$T(k_0) = \frac{(1 - R_1)(1 - R_2)\tau^2}{(1 - \sqrt{R_1 R_2}\tau^2)^2 + 4\sqrt{R_1 R_2}\tau^2 \sin^2 k_0 L_{cav}}, \quad (1)$$

式中 L_{cav} 为谐振腔的光学长度。定义透射光谱周期性干涉条纹的对比度(峰谷比)为 S ,并假定两个端面的反射率相同 $R_1 = R_2 = R$,则由(1)式经过简单计算有

$$S = \frac{T_{max}}{T_{min}} = \frac{(1 + R\tau^2)^2}{(1 - R\tau^2)^2}, \quad (2)$$

将通过实验得到的 S 值代入(2)式即可得到表征波导传输损耗的因子 $R\tau^2$ 。

$$R\tau^2 = \frac{\sqrt{S-1}}{\sqrt{S+1}}. \quad (3)$$

和截断法相比,这种测量方法避免了不同波导之间由于光纤与波导耦合情况的不同所带来的测量误差,从而增加了测量结果的可靠性。但是,这种方法对波长扫描分辨率要求很高(步长为 0.05 nm),波长扫描一次往往需要较长时间,而在这期间光波导的耦

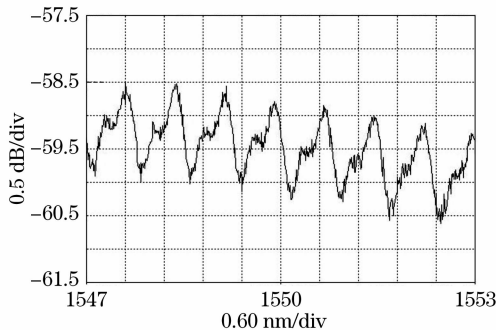


图 3 测量出的波导 F-P 腔周期性干涉条纹

Fig. 3 Measured periodic interference fringe in spectrum of a F-P cavity sample

合状态很有可能发生变化,这对测试条件的稳定性提出了挑战。另外此方法仅适用于 F-P 单腔结构,对于波导中间有多个反射界面形成的复合多腔结构,由于透射谱的形状和损耗的关系很复杂,这种方法也不再适用。图 3 是我们测量得到的波导 F-P 腔的透射谱,可以看到干涉条纹中有一些小的次峰,据分析这是由寄生的 F-P 腔干涉条纹叠加引起的。根据上述测量原理得到的传输损耗为 4.92 dB/mm。

2.3 F-P 腔光谱傅里叶变换分析法

F-P 腔干涉光谱条纹对比度分析法仅适用于单腔的情况,对于由不同结构波导连接处反射界面构成的复合多腔结构,其透射谱形状非常复杂,必须用 F-P 腔光谱傅里叶变换分析法才能在复杂的透射光谱中分离出各级腔的贡献,并提取出传输损耗[12]。

为简单起见,先介绍 F-P 单腔干涉光谱的傅里叶变换分析法。如图 2(a)所示的单腔波导结构,在一般情况下 $R_1 = R_2$,透射光谱表达式可简化为

$$T(k_0) = \frac{(1 - R)\tau^2}{(1 - R\tau^2)^2 + 4R\tau^2 \sin^2 k_0 L_{cav}}, \quad (4)$$

透射光谱干涉条纹的周期为 π/L_{cav} ,频率为 L_{cav}/π ,因此可以用光程 L 作为傅里叶变换谱频率的度量。对上式进行傅里叶变换

$$\mathcal{F}[T(L)] = \int T(k) \exp(j2Lk) dk, \quad (5)$$

(5)式是光程 L 的复函数,忽略其复相位而求其实部,可得[4~6]

$$|\mathcal{F}[T(L)]| = \sum_i \delta(L - iL_{\text{cav}}) [T_0 \exp(\gamma L / L_{\text{cav}})], \quad (6)$$

由此可见傅里叶变换谱为一系列幅度指数衰减的 δ 函数,如图 4 所示。其中 T_0 为谱平均功率, $T_0 = \frac{(1-R)^2 \tau^2}{1-R^2 \tau^4}$, $\gamma = \ln(R\tau^2)$ 为各级次峰幅值衰减系数。以上分析是假设扫描波矢范围趋于无穷的情况,在实际测量中扫描波矢范围有限,傅里叶变换谱则为一系列幅度指数衰减的 sinc 函数。

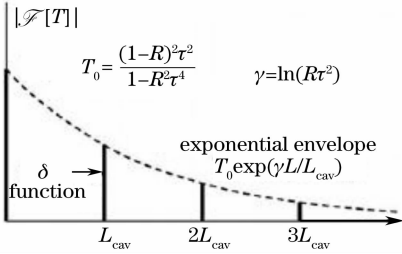


图 4 F-P 腔透射光谱干涉条纹的傅里叶变换谱
Fig. 4 Fourier transform spectrum of interference fringe of F-P cavity

从傅里叶变换谱各级次峰的高度中就可以提取出腔内的损耗。在 $L=0$ 位置的主峰最为突出,其高度为

$$P_0 = \frac{(1-R)^2 \tau^2}{1-R^2 \tau^4}. \quad (7)$$

如果事先测出腔面的反射率 R ,就可以从上式中解

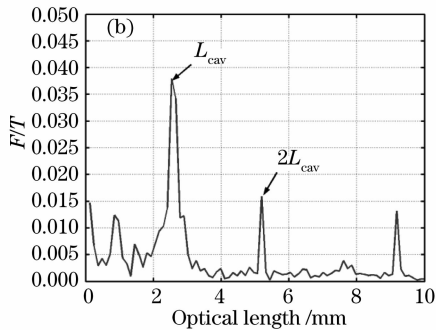
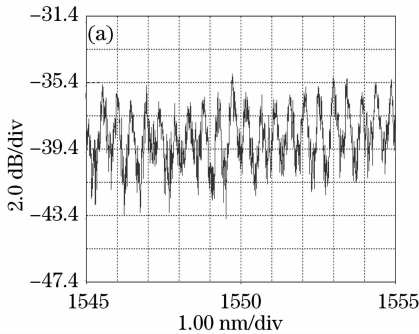


图 5 (a)光子线波导透射光谱扫描测量结果;(b)透射光谱测量结果的傅里叶变换谱

Fig. 5 (a) Measured spectrum of a photonic wire waveguide sample; (b) Fourier transform of the measured spectrum

测试时波长扫描范围为 1545~1555 nm,扫描间隔 0.005 nm。傅里叶变换谱的横坐标为谐振腔光学腔长,变换后得到谐振腔长的值与样品光学长度完全吻合,这进一步证明了图中的谐振峰确实来自于样品端面构成的谐振腔。经过计算得出波导端面对基模的反射率 R 为 24.4%,这样可得损耗因子

出损耗 τ^2 。对不同腔长分别测出各自的损耗 τ^2 ,然后以腔长为横坐标,以损耗 τ^2 为纵坐标,标出各实验点,对各实验点做线性回归得到拟合直线,直线的斜率就是单位长度的传输损耗。在复合多腔的情况下, $L=0$ 处的零级主峰包含了各级腔的共同贡献,因此不便从中提取损耗。然而其一级峰($L=L_{\text{cav}}$)的幅值为

$$P_1 = R\tau^2 \frac{(1-R)^2 \tau^2}{1-R^2 \tau^4}, \quad (8)$$

从(8)式中同样可以提取出损耗 τ^2 。与 F-P 腔光谱条纹对比度分析法相比,这种方法的缺点是测量结果依然会受到测量不同长度波导时输入/输出光纤耦合效率不确定性的影响,并且依赖于绝对光强(而非相对光强)。除了从单峰中提取损耗外,还可以从各级 F-P 腔相邻的两个峰的比值中提取损耗。例如对于单腔,相邻两峰的比值为 $R\tau^2$,这样不仅可以获得损耗因子,还可直接得到表征 F-P 腔光学质量的品质因子 Q ,因为 $Q = -2\pi / \ln(R\tau^2)$ 。从相邻两个峰的比值中提取损耗的优点是可以消除测量不同长度波导时输入/输出光纤耦合效率非重复性的影响,而且不依赖于绝对光强,这意味着与测量光源的输出功率漂移无关,因此是更好的测试方法。对截面尺寸为 670 nm×250 nm 的光子线波导进行测量,测量得到的 TE 模光谱及其傅里叶变换结果如图 5 所示。

τ^2 的值为 1.72。经过对不同长度的波导进行测量,就可以得到亚微米光子线波导的传输损耗。对长度为 10~50 μm 的一组实验波导(波导侧壁粗糙)进行了测量,通过比较傅里叶变换谱中相邻两个峰值的比值,得到的结果如图 6 所示,对实验点线性拟合后得到传输损耗为 21.38 dB/mm。

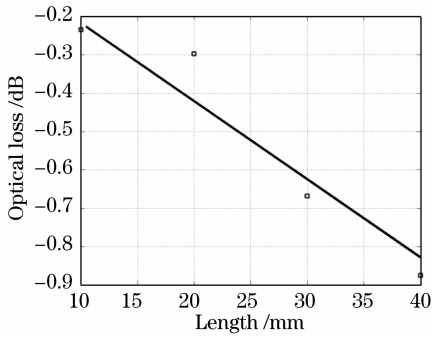


图6 用傅里叶变换谱峰值比较法得到的波导TE模传输损耗

Fig. 6 Propagation losses of TE mode of four waveguide samples using Fourier transform method

2.4 测试传输损耗的其他方法

除了上面介绍的测量波导传输损耗的主流方法外,还可用多次反射法、波导侧壁泄漏光衰减法等其他方法测量波导传输损耗。多次反射法是用精密反射仪测试分析波导前后端面各级反射峰的强度衰减并从中提取传输损耗的测试方法^[7,8],其优点是可分析测试复合多腔结构,缺点是由于空间分辨率的限制只能对较长波导有一定测试精度。损耗系数和各级反射峰相对比值的的关系为

$$\alpha = -\frac{1}{2L} \ln\left(\frac{1}{R_f^2} \frac{P_3}{P_2}\right) = -\frac{1}{2L} \ln\left(\frac{1}{R_f^2} \frac{P_4}{P_3}\right). \quad (9)$$

图7是用精密反射仪测量得到的波导前后端面各级反射峰的强度,由相邻两级反射峰的比值就可以由(9)式得出波导的损耗因子。

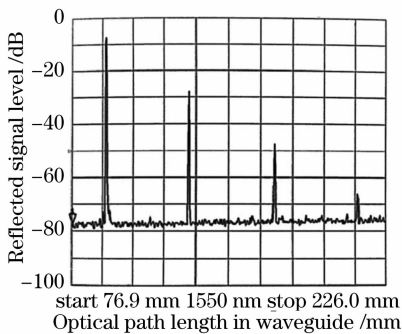


图7 用精密反射仪测量得到的波导前后端面各级反射峰的强度

Fig. 7 Multiple reflections from the waveguide facet recorded by precision reflectometer

3 结 论

通过对微纳光波导传输损耗常用的几种测试方法的介绍,包括截断法、F-P腔谐振谱条纹对比度分析法、傅里叶变换法、多次反射法等,分析归纳出了

各种测试方法的优缺点和适用条件。其中截断法是最常用的测量方法,但是由于不同长度波导和光纤耦合状态的不确定性,导致测量误差较大;F-P腔谐振谱条纹对比度分析法能够消除波导和光纤耦合状态的不固定带来的误差,但是只能测量单一F-P谐振腔的波导结构,对于复杂的多腔结构无能为力;傅里叶变换法不仅能够消除波导和光纤耦合状态的不固定带来的误差,而且能够用傅里叶变换谱中各级峰位来表征各级子谐振腔的强弱,并通过相邻峰位的比值来提取出波导的传输损耗;多次反射法可消除波导和光纤耦合状态的不固定带来的误差,而且可以测量复合多腔波导结构,但是由于空间分辨率有限,只能测量厘米量级以上的长波导。在实际测量中,要根据待测波导结构、测试精度要求、测试仪器设备条件等因素来灵活确定测试方案。

参 考 文 献

- 1 A. Rickman, G. T. Reed, B. L. Weiss *et al.*, Low-loss planar optical waveguides in SIMOX material [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(6): 633~635
- 2 R. G. Walker, Simple and accurate loss measurement technique for semiconductor optical waveguides[J]. *Electron. Lett.*, 1985, **21**: 581~583
- 3 T. Feuchter, C. Thirstrup, High precision planar waveguide propagation loss measurement technique using a Fabry-Pérot cavity[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(10): 1244~1247
- 4 D. Hofstetter, R. L. Thornton, Measurement of optical cavity properties in semiconductor lasers by Fourier analysis of the emission spectrum [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(10): 1914~1923
- 5 D. Hofstetter, R. L. Thornton, Loss measurements on semiconductor lasers by Fourier analysis of the emission spectra [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **72**(4): 404~406
- 6 Talneau, M. Mulot, S. Anand *et al.*, Compound cavity measurement of transmission and reflection of a tapered single-line photonic-crystal waveguide[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(16): 2577~2579
- 7 Shaowu Chen, Qingfeng Yan, Qingyang Xu *et al.*, Optical waveguide propagation loss measurement using multiple reflections method[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **256**: 68~72
- 8 Kazuo Kasaya, Yuzo Yoshikuni, Hiroyuki Ishii, Measurements of a semiconductor waveguide using a low-coherence interferometric reflectometer[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(2): 251~253
- 9 Y. Okamura, S. Yoshinaka, S. Yamamoto, Observation of wave propagation in integrated optical circuits[J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(19): 3405~3408
- 10 S. Dutta, H. E. Jackson, J. T. Boyd *et al.*, CO₂ laser annealing of Si₃N₄, Nb₂O₅ and Ta₂O₅ thin-film optical waveguides to achieve scattering loss reduction [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, **QE-18**(4): 800~806
- 11 J. M. Naden, G. T. Reed, B. L. Weiss, Analysis of prism-waveguide coupling in anisotropic media [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1986, **4**(2): 156~159
- 12 Wim Bogaerts, Nanophotonic Waveguides and Photonic Crystals in Silicon-on-Insulator[D]. University Gent, 2003. 185~206