

# 小尺寸硅绝缘体光波导损耗测量

刘军 袁晓东 罗章 郭楚才 叶卫民

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 基于法布里-珀罗(F-P)腔理论建立了一种简单有效的硅绝缘体(SOI)光波导损耗测量方法。该方法采用端面耦合,通过测试波导反射功率谱并利用傅里叶频谱信息,完成波导损耗的测量。推导中指出了无法直接利用反射谱 F-P 峰谷值求解损耗的限制因素。应用该方法实现了对刻蚀深度为 750 nm 和宽度为 1200 nm 的 SOI 脊形波导损耗的测量,表明该测量方法能够对小尺寸、低损耗波导实现较高精度的损耗测量。

**关键词** 集成光学;法布里-珀罗腔技术;脊形波导;损耗测量;反射谱

**中图分类号** TN252 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.021301

## Loss Measurement of Small-Size Silicon-on-Insulator Ridge Waveguide

Liu Jun Yuan Xiaodong Luo Zhang Guo Chucai Ye Weimin

(College of Photoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology,

Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** A loss measurement method on silicon-on-insulator (SOI) waveguide is proposed on the basis of Fabry-Perot (F-P) cavity theory. Through end coupling, the method utilizes the Fourier transform information of the reflection power spectrum to achieve the waveguide loss measurement. In the process of derivation, the main reason why the loss index can not be directly solved from the peak and valley values of the F-P peaks of reflection spectrum is presented. In the experiment, the loss measurement on a SOI ridge waveguide with an etching depth of 750 nm and a width of 1200 nm is achieved by using the method, which indicates that the method can be used for the loss measurement on small size low-loss waveguides with a relatively high accuracy.

**Key words** integrated optics; Fabry-Perot cavity technique; ridge waveguide; loss measurement; reflection spectrum

**OCIS codes** 130.0130; 120.0120; 220.0220

## 1 引言

硅绝缘体(SOI)具有优良的光电属性,同时它的加工工艺与成熟的微电子工艺有良好的兼容性,因此 SOI 已经逐步成为继硅基底之后最有可能实现单片光集成的基底材料。SOI 光波导作为一种重要的集成光子器件,在光调制、光开关、光转换、滤波以及光放大等研究领域中得到广泛的应用。在商业化应用之前,损耗是最受关注的问题之一,破除损耗这一核心问题已经成为了集成光学与光子技术等研究领域的重要研究课题。为准确地表征介质波导的损耗性质,损耗测量方法的相关研究也随之展开。

早在 20 世纪 90 年代,有关波导传输损耗的测量问题研究已经广泛开展,发展至今,常见的测量方法有透射测量法、环形谐振腔调制测量法<sup>[1,2]</sup>、法布里-珀罗(F-P)谐振腔技术<sup>[3,4]</sup>、截断法<sup>[5,6]</sup>、背反射耦合方法<sup>[7,8]</sup>、插入损耗测量技术<sup>[9]</sup>、散射测量法<sup>[10,11]</sup>和棱镜耦合法<sup>[12,13]</sup>等。以上的一些损耗测量方法在测试精度和实际操作中存在测量误差大和操作复杂等问题,如透射测量法对光耦合效率的一致性要求很高从而无法保证实验的高精度和重复性;环形谐振腔调制测量法由于必须在集成芯片上外加一个环形腔进而使得损耗测量过程更加复

收稿日期: 2010-10-29; 收到修改稿日期: 2010-11-02

作者简介: 刘军(1986—),男,硕士研究生,主要从事纳米光子学器件方面的研究。E-mail: liujun09@gmail.com

导师简介: 袁晓东(1961—),男,教授,主要从事半导体理论与器件、纳米光子学理论与器件等方面的研究。

E-mail: xyuan@nudt.edu.cn

杂而且无法实现直接测量;散射测量法对测试光源如荧光光源需要很高的传输功率;截断法不仅需要破坏测试样品,而且无法保证两次测量波导端面的一致性(受端面解理质量的影响)和输入光耦合效率的相同,对于测量精度要求较高的低损耗波导的测量较难实现;棱镜耦合法虽然测量精度较高且容易实现,但耦合棱镜必须与样品直接接触,使其应用范围局限于掩埋型波导损耗的测量。因此,以上这些损耗测量方法并不适合小尺寸、低损耗的 SOI 光波导损耗的测量。

F-P 谐振腔技术对硅基波导损耗的测量具有先天优势,对于常见的低损耗波导(如 SOI 脊形波导)由于能获得非常清晰的 F-P 峰从而能使测量结果更加可靠。传统的 F-P 方法是基于测试波导形成的 F-P 谐振腔的透射谱进行损耗测量的,因此传统的 F-P 方法对波导端面的光耦合要求较高,对于端面大尺寸的波导容易对准,经过对端面抛光处理后能获得较高的测试精度和较好的测试稳定性。对于集成光路与光互连器件中惯用的小尺寸(亚微米)波导损耗的测量,F-P 方法的操作过程将更加复杂,测量误差也随之增大。另外,在波导腔的  $Q$  值很高的情况下,传统的 F-P 方法误差较大。

本文提出基于测试波导反射谱测量波导传输损耗的方法,利用波导反射谱的傅里叶级数展开,通过分析相邻的谐波项与损耗的关系进而形成新型的 F-P 方法,并指出了无法直接利用反射谱对比因子求解损耗系数的原因。

## 2 理论基础讨论

对于亚微米尺寸的 SOI 脊形波导,其高质量的端面可以由解理直接获得,反射率约为 0.3,形成实验所需的 F-P 谐振腔,对这样一个谐振腔可以写出其透射和反射光振幅的几何级数。根据文献[14]报道的结果,其中透射光振幅可表示为

$$A(\beta) = [1 - R \exp(-2i\psi)] \times \sum_{m=0}^{\infty} [R \exp(-2i\psi)]^m \exp(2imL\beta) \exp[-2(m+0.5)kL\beta], \quad (1)$$

式中  $\beta = 2\pi/\lambda$ ,  $n$  为折射率,  $k$  代表吸收系数,  $R$  为端面的功率反射率,  $L$  为波导长度,  $\psi = \arctan(-2k/n^2 + k^2 - 1)$  为端面反射引起的相位变化。

类似地,可以写出反射光振幅的级数表达式。如图 1 所示,对于反射功率谱所得数值应包括:1)由波导前端面直接反射而来的散射光;2)进入 F-P 谐振腔只经过波导后端面反射回来的反射光;3)进入 F-P 谐振腔并经历波导两个端面反射的反射光。显然经历波导传输损耗的是后两部分光,按照波导等效腔结构中光振幅传输性质,模式对波导长度为  $L$  的波导都将产生相移  $-\beta nL$ <sup>[15]</sup>, 因此总的反射光振幅的几何级数展开可表示为

$$A(\beta) = r_0 + \eta t_1^2 r_2 \exp(-2i\psi) \exp(-i\phi) \exp(-2\alpha L) + \sum_{m=1}^{\infty} \eta t_1^2 r_2 \times \exp(-2i\psi) \exp(-i\phi) \exp(-2\alpha L) [R \exp(-2\alpha L) \exp(-2i\psi) \exp(-i\phi)]^m, \quad (2)$$

式中  $r_0$  为波导前端面直接反射的振幅系数;  $\eta$  表示波导的耦合效率;  $R = r_1 r_2$ ,  $r_1, r_2$  为振幅反射率;  $t_1$  为振幅透射率; 腔内经历相移  $\phi = 2\beta nL$ ;  $\alpha$  表示波导损耗系数。由于本文主要考虑波导的传输损耗,因此为了使(2)式简化,不单纯考虑端面引起的吸收损耗,而是统一用端面反射率体现,从而(2)式化简为

$$A(\beta) = r_0 + \eta t_1^2 r_2 \exp(-i\phi) \exp(-2\alpha L) + \sum_{m=1}^{\infty} \eta t_1^2 r_2 \exp(-i\phi) \exp(-2\alpha L) \times [R \exp(-2\alpha L) \exp(-i\phi)]^m. \quad (3)$$

实验中所测得的物理量为反射光功率:  $I(\beta) = A(\beta) \times A^*(\beta)$ 。于是,由(3)式可以推导出反射光功率

$$I = r_0^2 + \frac{\eta^2 t_1^4 r_2^2 \exp(-2\alpha L)}{1 - [R \exp(-2\alpha L)]} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\eta^2 t_1^4 r_2^2 \exp(-2\alpha L)}{1 - [R \exp(-2\alpha L)]} \times [R \exp(-2\alpha L)]^m \cos(m\phi) + 2\eta r_0 t_1^2 r_2 \exp(-2\alpha L) \sum_{m=0}^{\infty} [R \exp(-2\alpha L)]^m \cos[(m+1)\phi]. \quad (4)$$

由(4)式看出,直流项  $r_0^2$  由于是个随机量,对于不同光路对准情况、耦合系数、光斑大小以及其他实验因素都有不同的值,首先缺乏可操作性,若是针对单次测量,则在损耗系数外又多出一个未知量,对比因子  $K = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$  只能引入一个方程从而无法同时解出直流项振幅系数  $r_0$ 。另外由于直流项未进入

波导腔内,它与 F-P 谱线上的其他信息(如清晰因子  $F$ )没有关系,于是无法找出第二个与之相关联的方程。在截断法测量中,可以考虑不同波导长度下获得两个方程,但第二次测量时已经无法保证两次具有相同的直流项。因此,鉴于以上几方面的原因,实验中无法直接利用反射功率谱获得波导的损耗系数。为了解决这一矛盾,利用反射功率谱的傅里叶变换频谱信息,即根据相邻谐波傅里叶系数之比与波导腔内损耗的关系获得损耗系数<sup>[16,17]</sup>。根据傅里叶展开的各项系数表达式,可以看出二次谐波和一次谐波系数比值

$$P = \frac{C_2}{C_1} = R \exp(-2\alpha L), \quad (5)$$

式中傅里叶级数的系数可表示为

$$C_m = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I(\phi) \exp(-im\phi) d\phi. \quad (6)$$

可以看出,与波导损耗相关的傅里叶展开系数之比不含耦合效率系数,即所得的测量结果与耦合效率无关。如果是利用透射谱的傅里叶频谱信息求解波导损耗,则原理上可以利用任何相邻的谐波项系数之比计算损耗系数<sup>[14]</sup>,而这里则是使用零次谐波(基频波)以外的一次谐波和二次谐波项信息,主要原因是基频波包含了未经历腔内损耗的直流信息<sup>[17]</sup>,而更高次的谐波受到各种噪声信号的影响更加明显,会带来更大的误差,因此为了最大限度地减小测量误差,需要采用除基频以外较低阶的高次谐波项信息。从(5)式的结果可以看出,只需要得到  $P$  值,就可获得波导的损耗系数  $\alpha$ 。

### 3 实验结果分析

实验中,采用反应离子束刻蚀方法制备了内脊高  $H=1.5 \mu\text{m}$ ,外脊高  $h=0.75 \mu\text{m}$ ,刻蚀深度  $d=0.75 \mu\text{m}$ ,波导宽度  $W=1.2 \mu\text{m}$  的 SOI 脊形光波导。该波导结构设计满足单模传输条件<sup>[18]</sup>,利用仿真模块对以上结构进行数值模拟,所得的波导横向模场分布模拟结果如图 2 所示。可以看出以上结构参数下的波导对光具有很好的约束能力,在取表层硅折射率为 3.4,缓冲层  $\text{SiO}_2$  的折射率为 1.45 时,获得该结构下波导单模传输模式有效折射率为  $n_{\text{eff}}=3.3$ 。为了验证该方法损耗测量的有效性,利用其对制备的波导样品进行了传输损耗的测量。

损耗测量的实验光路设计如图 3 所示, $S_1, S_2$  均为半透半反镜;A 为光纤支架;B 为凸透镜;D 为 SOI 波导基片;OM 为光学显微镜,主要用于波导的选取和进行波导的粗对准,是实验的辅助装置;C, E 均为物镜,规格分别为  $60\times, 40\times$ ,其中物镜 C 主要是起到光束聚焦的作用,而另外一个物镜 E 是用于收集波导的透射光。需要指出的是,输入表示可见光宽谱光源和可调谐激光光源两种输入光源,根据需要只输入一种光,在保证光路准直后,首先采用可见光光源,此时光路为端面耦合对准监视系统,通过可见光 CCD 成像,可以在计算机显示屏上清晰地看到波导解理端面。图 4 所示为可见光 CCD 下的 SOI 脊形波导端面照片,其中右上角的插图显示为更小光斑时的波导端面照片,此时对应更高的耦合效率,若要使光尽可能多地耦合进波导中,即使得入射光斑的尺寸更小,可以通过物镜 C 的调焦来实现。

另外,实验装置示意图的后半部分(以波导为基准)为红外成像部分,在该实验中的主要目的是为了观察波导的透射光,以粗略判断重复测量时光对波导不同的耦合效率。图 5 所示即为该波导在  $1550 \text{ nm}$  波长的

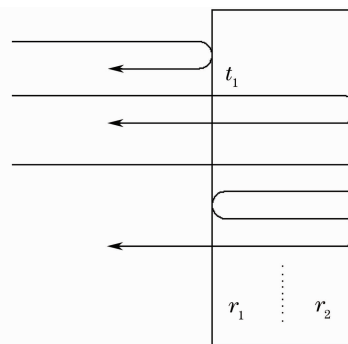


图 1 波导等效腔结构示意图

Fig.1 Equivalent cavity scheme of waveguide

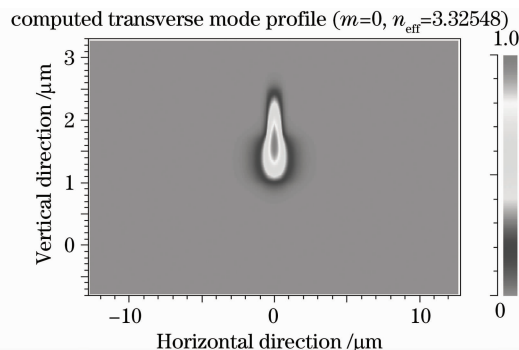


图 2 SOI 脊形波导横向场分布

Fig.2 SOI ridge waveguide transverse field distribution

光入射下,波导透射光的红外 CCD 照片,可以看出实验中制备的 SOI 脊形波导具有很好的传光特性,对光具有很强的约束能力,另外也说明借助波导端面成像监视系统容易实现较高的耦合效率。

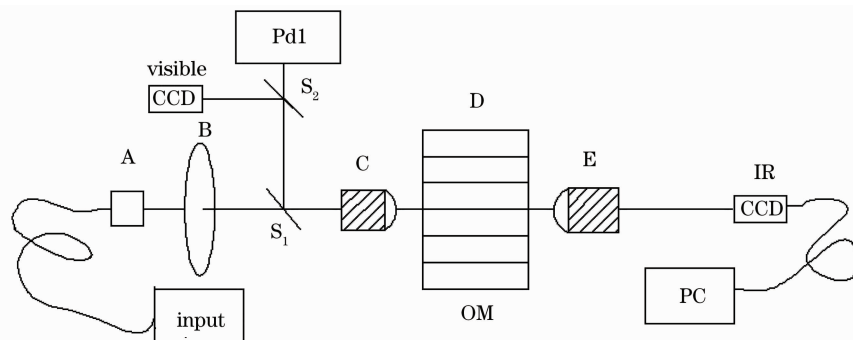


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Experimental setup

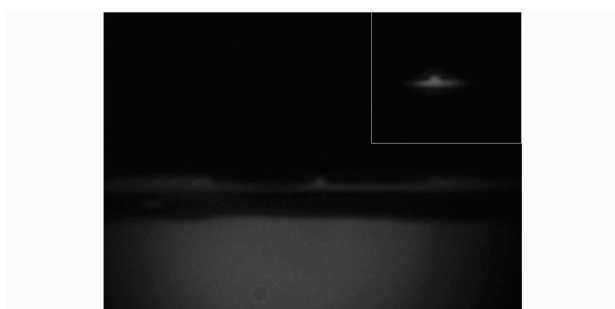


图 4 可见光 CCD 波导端面成像照片

Fig. 4 Visible CCD image of the waveguide end

对于 SOI 波导解理面的反射率约为 0.3, 实测波导长度  $L$  约为 0.32 cm, 因此, 可以由  $\Delta\lambda = \lambda_0^2 / (2n_{\text{eff}}L)$  计算得到对波长为 1550 nm 的光, 其 F-P 峰的理论波长间隔为 0.122 nm。通过物镜调焦将波导端面放置光斑中心位置, 然后将输入光源换作可调谐激光光源, 激光输出前关闭可见光 CCD, 为了排除  $S_3$  可能带来的误差在进行光谱测量之前将其去掉。实验利用可调谐激光器 (Agilent8164B) 进行波长扫描, 波长扫描范围为 1546~1550 nm, 扫描步长为 1 pm (远小于计算所得的波长间隔理论值), 通过波长连续扫描方式获得波导反射功率谱 (如图 6 所示)。在相同的耦合效率下通过改变入射功率重复测量同一波导样品, 发现反射谱线受到直流项的影响整体向上 (对应更高的入射功率) 或向下 (对应更低的入射功率) 移动, 而谱线形状保持不变。从图中可以看出实验测得的波长间隔约为 0.17 nm, 较理论值偏大, 考虑主要是由于实验室所用硅刻工艺的精度有限引起的结构误差所造成的。另外可以看出 F-P 腔的谱线过了 1548 nm 后开始有较为明显的上扬, 主要的原因是红外探测器 Pd1 对不同波长光的响应度不同, 而本文所采用的光功率计 Pd1 (New Focus-Model 2153) 的波长响应范围为 800~1700 nm, 在 1600 nm 处响应最强。图 6 中输出光电压为  $V_{\text{out}} = P_{\text{in}} \cdot R \cdot G$ , 其中  $P_{\text{in}}$  为接收到的光功率,  $R$  为功率计的响应度,  $G$  为放大器跨阻抗增益。

利用数值方法对图 6 所示的功率反射谱进行傅里叶变换, 所得的傅里叶变换谱如图 7 所示, 横坐标为变化周期, 它与波长间隔  $\Delta\lambda$  成比例, 纵坐标对应于各个分量的相对强度。谱线相对强度最大的为基频项, 横坐标值为 0.1739 nm, 对应与腔长为  $L$  的频率间隔。根据第一部分的推导可以看出零次谐波中含有直流成分, 因此采用一次和二次谐波的信息, 如图 7 的插图所示, 为傅里叶变换谱中高次谐波部分的局部放大, 相对强度最大的



图 5 SOI 脊形波导透射光 CCD 照片

Fig. 5 Transmission image of SOI ridge waveguide

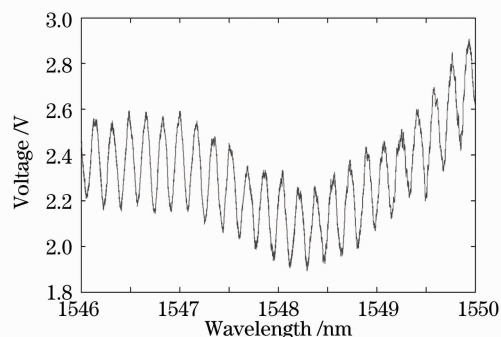


图 6 波导反射功率谱图

Fig. 6 Reflection spectrum of the waveguide

为一次谐波对应的谱线,与其相邻左边为二次谐波谱线。根据F-P腔纵模的性质,一次谐波位置对应于腔长为 $2L$ 的频率间隔,即 $0.1739\text{ nm}$ 的 $1/2$ ,计算值为 $0.08695\text{ nm}$ ,图示峰的位置为 $0.08696\text{ nm}$ ,相对强度为 $358.7$ 。二次谐波位置对应于腔长为 $3L$ 的频率间隔为 $0.1739\text{ nm}$ 的 $1/3$ ,计算值为 $0.058\text{ nm}$ ,图示位置为 $0.063\text{ nm}$ ,有一定的偏移,对应的相对强度为 $188.9$ 。由此可得到二次谐波和一次谐波相对强度之比,对应于傅里叶级数二次项与一次项系数之比 $P=0.5267$ 。经过对同一波导样品在不同的耦合效率下重复测量发现,傅里叶频谱中基频的位置基本不变;对于四次谐波以及更高次的谐波分量由于相对强度较小进而会引入较大的误差,因此,实际测量若要采用高次谐波项则需要对重复测量的结果取平均值以减小误差。二次和一次谐波的相对强度之比变化很小,因此在采用一次谐波和二次谐波信息时,可以直接采用单次测量结果进行求解即可获得比较可靠的损耗系数。波导端面光强反射率 $R$ 取 $0.3$ ,腔长 $L$ 取实测波导长度 $0.32\text{ cm}$ ,则波导的传输损耗系数为

$$\alpha = -\frac{\ln(P/R)}{2L}, \quad (7)$$

可计算出 $\alpha$ 约为 $0.88\text{ cm}^{-1}$ ,换算为常用的损耗单位约为 $3.78\text{ dB/cm}$ 。文献[19~21]报道的亚微米到微米尺寸的SOI脊形光波导实验结果的损耗可以达到 $0.1\sim 0.3\text{ dB/cm}$ 左右,本文制备的SOI脊形波导的损耗系数明显偏大,主要是制备工艺精度的差异以及波导侧壁粗糙度引起的散射损耗造成的<sup>[22,23]</sup>,通过对波导侧壁的进一步处理可以改善其粗糙度,可以在一定程度上降低波导的传输损耗<sup>[24,25]</sup>。另外由(7)式可以看出,波导长度 $L$ 对损耗测量的精度有一定的影响,相比较而言,长度较短的波导现象明显,各个峰的位置分得更开,从而测量精度更高。另外从整个测量过程可以看出波导损耗越小,即 $\alpha$ 越小,会使得 $P$ 值变大从而能在傅里叶谱图上读出更多的高次谐波项,从而使测量误差减小,提高测试精度,相反对于损耗较大波导,更高次的谐波往往被噪声淹没而使测量精度下降。

## 4 结 论

作为对目前采用端面耦合进行波导损耗的常见测量方案的补充,本文在传统的F-P腔波导损耗测量方法的基础上,采用波导反射谱的傅里叶信息建立了一种简单有效的SOI光波导损耗测量方法。利用反应离子束刻蚀技术实验制备了亚微米尺寸单模传输SOI脊形波导,并借助该方法对制备的脊形波导进行了损耗测量。通过在不同耦合效率下重复测量同一样品,证实利用一次和二次谐波信息可以获得相近的波导损耗系数,而对于更高次谐波由于噪声的影响明显则会带来较大的误差。相比传统的损耗测量方法,该方法易于实现,对于低损耗波导的测量精度较高,测量过程中不会对样品造成损坏,对集成光路中涉及的小尺寸低损耗波导的损耗测量有一定的优势。

## 参 考 文 献

- 1 R. Adar, Y. Shani, C. H. Henry *et al.*. Measurement of very low-loss silica on silicon waveguides with a ring resonator [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **58**(5): 444~445
- 2 V. Van, P. P. Absil, J. V. Hryniewicz *et al.*. Propagation loss in single-mode GaAs-AlGaAs microring resonators: measurement and model [J]. *J. Lightw. Technol.*, 2001, **19**(11): 1734~1739
- 3 R. Regener, W. Sohler. Loss in low-finesse Ti:LiNbO<sub>3</sub> optical waveguide resonators [J]. *Appl. Phys. B*, 1985, **36**(3): 143~147
- 4 R. G. Walker. Simple and accurate loss measurement technique for semiconductor optical waveguides [J]. *Electron. Lett.*, 1985, **21**(13): 581~583
- 5 L. S. Yu, Q. Z. Liu, S. A. Pappert *et al.*. Laser spectral linewidth dependence on waveguide loss measurements using the

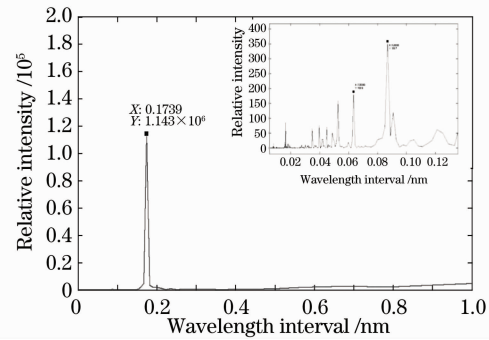


图7 波导反射谱的傅里叶频谱  
Fig. 7 Fourier transform of waveguide reflection spectrum

- Fabry-Perot method[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(5): 536~538
- 6 B. W. Hakki, T. L. Paoli. Gain spectra in GaAs double-heterostructure injection lasers[J]. *J. Appl. Phys.*, 1975, **46**(3): 1299~1306
- 7 Paul. J. Brannon. Improved method of measuring optical waveguide propagation losses[J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(20): 3596~3597
- 8 Roberta Ramponi, Roberto Osellame, Marco Marangoni. Two straightforward methods for the measurement of optical losses in planar waveguides [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2002, **73**(3): 1117~1120
- 9 G. Tittelbach, B. Richter, W. Karthe. Comparison of three transmission methods for integrated optical waveguide propagation loss measurement[J]. *Pure Appl. Opt.*, 1993, **2**(6): 683~706
- 10 Y. Okamura, S. Yoshinaka, S. Yamamoto. Measuring mode propagation losses of integrated optical waveguides; a simple method[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(23): 3892~3894
- 11 R. K. Hickernell, D. R. Larson, R. J. Phelan *et al.*. Waveguide loss measurement using photothermal deflection[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(13): 2636~2638
- 12 C. Teng. Precision measurements of the optical attenuation profile along the propagation path in thin-film waveguides[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(7): 1051~1054
- 13 A. Boudrioua, J. C. Loulergue. New approach for loss measurements in optical planar waveguides[J]. *Opt. Commun.*, 1997, **137**(3): 37~40
- 14 Daniel Hofstetter, Robert L. Thornton. Loss measurements on semiconductor lasers by Fourier analysis of the emission spectra[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **72**(4): 404~406
- 15 Larry A. Coldren, Scoot W. Corzine. Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits[M]. Shi Hanxing Transl.. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2006. 50  
拉里 A. 科尔德伦, 斯科特 W. 科尔津. 二极管激光器与集成光路[M]. 史寒星译. 北京:北京邮电大学出版社,2006. 50
- 16 W. H. Guo, Q. Y. Lu, Y. Z. Huang *et al.*. Fourier series expansion method for gain measurement from amplified spontaneous emission spectra of Fabry-Pérot semiconductor lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2004, **40**(2): 123~129
- 17 W. H. Guo, D. Byrne, Q. Y. Lu *et al.*. Waveguide loss measurement using the reflection spectrum [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(16): 1423~1425
- 18 J. Lousteau, D. Furniss, A. Seddon *et al.*. The single-mode condition for silicon-on-insulator optical rib waveguides with large cross section[J]. *J. Lightw. Technol.*, 2004, **22**(8): 1923~1929
- 19 Haisheng Rong, Shengbo Xu, Ying-hao Kuo *et al.*. Low-threshold continuous-wave Raman silicon laser [J]. *Nature Photon.*, 2007, **1**(4): 232~237
- 20 U. Fischer, T. Zinke, J.-R. Kropp *et al.*. 0.1 dB/cm waveguide losses in single-mode SOI Rib waveguides[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(5): 647~648
- 21 Daniel Pergande, Ralf B. Wehrspohn. Losses and group index dispersion in insulator-on-silicon-on-insulator ridge waveguides[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(5): 4590~4600
- 22 K. K. Lee, D. R. Lim, H.-C. Luan *et al.*. Effect of size and roughness on light transmission in a Si/SiO<sub>2</sub> waveguide: experiments and model [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**: 1617~1619
- 23 K. K. Lee, D. R. Lim, L. C. Kimerling *et al.*. Fabrication of ultralow-loss Si/SiO<sub>2</sub> waveguides by roughness reduction [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(23): 1888~1890
- 24 L. K. Rowe, M. Elsey, N. G. Tarr *et al.*. CMOS-compatible optical rib waveguides defined by local oxidation of silicon [J]. *Electron. Lett.*, 2007, **43**(7): 392~393
- 25 D. K. Sparacin, S. J. Spector, L. C. Kimerling. Silicon waveguide sidewall smoothing by wet chemical oxidation[J]. *J. Lightw. Technol.*, 2005, **23**(8): 2455~2461