

应力对 M-Z 型 InP/InGaAsP-EAM 偏振 相关损耗的影响*

蔡 纯^{1,2} 刘 旭¹ 肖金标¹ 丁 东¹ 张明德¹ 孙小菡¹

(1 东南大学电子工程系光子学与光通信研究室, 南京 210096)

(2 东南大学生物医学工程系博士后流动站, 南京 210096)

摘 要 采用 Agilent 81910A 光子全参量测试仪, 首次实验研究了 InP/In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}P_y-MQW (Multiple-Quantum-Well, MQW) 材料与衬底间因应力而产生的 M-Z 型光调制器的 PDL 影响以及由此引起的由差分群时延 (Differential Group Delay, DGD) 表征的偏振模色散 (Polarization Mode Dispersion, PMD). 研究表明, 半导体 MQW 光调制器的 PDL 与 DGD 是一致的. 因此, 在半导体光器件的制作过程中, 应尽可能地减小衬底与波导芯层之间的因残存应力的存在造成对光器件的高速性能的不利影响.

关键词 InP/InGaAsP; 偏振相关损耗; 应力; 差分群时延; 多量子阱; Stokes 模型

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A

0 引言

光纤通信系统中的由器件(如调制器/开关、滤波器、隔离器等)累积的偏振相关损耗(Polarization-dependent loss, PDL)可以显著影响整个线路的传输特性, 光无源器件的 PDL 现已成为描述器件特性的一项重要指标. N. Gisin^[1] 给出了光通信系统中 PDL 的定义及其统计特性. Yan 等人^[2] 指出, 当系统的瞬时 PDL 为 2.6 dB 时, 在 29 dB 光学信噪比的条件下, 可以产生 3 dB 的功率代价. B. Huttner 等人^[3] 发现, 由于 PDL 的存在导致单模光纤中的 2 个主偏振态(PSP)的光脉冲分量发生干涉, 使得出射光脉冲反常展宽. Kim 等人^[4] 指出系统中累积 PDL 尽管小到 0.5 dB, 仍然会对系统的 PMD 补偿方案的补偿效果产生严重的抑制. 由文献报道的研究结果表明, 在高速光通信系统中, PDL 不但会使光脉冲的幅度减小, 同时它还和偏振模色散相结合, 相互影响, 使脉冲展宽更加严重, 增加系统的误码率, 显著降低通信系统的性能.

通常, 半导体光器件是由衬底、芯、包层等数层结构组成的, 它们各自的掺杂材料不一样, 热膨胀系数也不一样. 因此在横面上即使有很小的应力不对称, 也会导致光器件芯材料的各向异性, 从而通过光弹性效应产生应力双折射^[5~9]. 也就是说, 半导体光器件制作过程的残存应力(这种应力是本征应力与热应力之和), 将造成光器件沿不同的方向有不同的有效折射率, 即导致光器件的双折射, 使两个正交

偏振模之间有轻微的传输群速度差, 从而形成 PMD. 而半导体多量子阱光器件就是这类典型的多层结构, 因此对应用在高速系统中的 III-V 族半导体多量子阱(MQW)无源光器件的 PDL 进行系统的实验研究是必须的, 尤其是对工作在 1.55 μm 长波长窗口的 InP/InGaAsP-MQW 这类衬底与量子阱层间有大失配的材料系统.

本文采用国内先进的半导体工艺线制作了 InP/In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}P_y-MQW-M-Z 型光调制器, 并用 Agilent 公司的 81910A(光子全参量测试仪)首次实验研究了 MQW 波导芯层与衬底间因应力而产生的 PDL, 以及由此引起的由 DGD 表征的 PMD.

1 理论模型

1.1 用 Stokes 模型表征光器件的 PDL

在光纤通信系统中, 许多光器件对光信号的两个本征主偏振态(Principle State of Polarization, PSP)具有不同的透射或者吸收系数, 即光器件的 PDL 是入射光信号 PSP 的函数. 在有 PDL 器件的光纤通信系统中, 让等强度的 PSP 光经过该器件, 选取最大透射率 T_{\max} 和最小透射率 T_{\min} 对应的透射光, 则该光器件的 PDL 定义为^[10]

$$\text{PDL} = \Gamma = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max} + T_{\min}} \quad (1)$$

或者表示成

$$\text{PDL}_{\text{dB}} = -10 \log\left(\frac{T_{\min}}{T_{\max}}\right) = -10 \log\left(\frac{1-\Gamma}{1+\Gamma}\right) \quad (2)$$

式中, T_{\max} 和 T_{\min} 分别对应的是一对正交 PSP.

而在 Stokes 空间, 光的 PSP 可用 4×1 的 Muller 实数矩阵表示为 $S = [S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3]^T$. 经过光学系统后, 入射光和出射光的 Stokes 矢量可通过

*“十五”863 高技术研究发展计划(2002AA31230)资助

Tel: 025-83792469-803 Email: caicren@seu.edu.cn

收稿日期: 2005-08-30

$$S_{out} = MS_{in} \quad (3)$$

联系起来,其中 M 是光学系统的传输矩阵(也称 Muller 矩阵).对存在 PDL 的光器件,其 Jones 矩阵可以表示为

$$J = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \sqrt{T_{min}/T_{max}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

令 $\alpha = \sqrt{T_{min}/T_{max}}$,为简化问题的复杂性,不考虑光器件中的偏振无关损耗以及其它的偏振相关效应,则式(1)可表示为

$$PDL_{dB} = -20 \log \alpha \quad (5)$$

而有 PDL 的光器件的 Muller 矩阵与 Jones 矩阵的关系为^[8]

$$M = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(1+\alpha^2) & \frac{1}{2}(1-\alpha^2) & 0 & 0 \\ \frac{1}{2}(1-\alpha^2) & \frac{1}{2}(1+\alpha^2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha \end{bmatrix} \quad (6)$$

将式(6)代入式(3),则有如下的关系式

$$\left. \begin{aligned} S_{0,out} &= \frac{1+\alpha^2}{2} S_{0,in} + \frac{1-\alpha^2}{2} S_{1,in} \\ S_{1,out} &= \frac{1-\alpha^2}{2} S_{0,in} + \frac{1+\alpha^2}{2} S_{1,in} \\ S_{2,out} &= \alpha S_{2,in} \\ S_{3,out} &= \alpha S_{3,in} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中, $S_{0,in}$ 、 $S_{1,in}$ 、 $S_{2,in}$ 、 $S_{3,in}$ 分别是入射光信号的 Stokes 分量, $S_{0,out}$ 、 $S_{1,out}$ 、 $S_{2,out}$ 、 $S_{3,out}$ 分别是出射光信号的 Stokes 分量,式(5)即为用 Stokes 模型表征的光器件的 PDL 表达式既 Muller-Stokes 分析法.

1.2 光子全参量测试仪测量 PDL 的原理

Agilent81910A 光子全参量测试仪可以测试与偏振相关的 DGD、PDL、群时延以及色度色散等参量.光器件的偏振相关损耗测量采用了 Mueller-Stokes 方法.测试系统由一个波长可调谐的高相干窄带激光器(TLS)、偏振控制器(Pol. Cont.)、光功率计、矢量探测器以及计算机数据采集等构成.偏振控制器由一个偏振器、一个 $\lambda/4$ 波片和 $\lambda/2$ 波片构成.偏振器产生一种线性偏振光,而通过 $\lambda/4$ 波片和 $\lambda/2$ 波片则将线性偏振光转换成其它偏振光.在 81910A 中,由偏振控制器可给出四种偏振态,测试仪以波长扫描的方式对四种偏振态进行波长相关扫描.由计算机数据采集系统采集记录每种偏振态中的波长相关数据,在此基础上采用 Muller-Stokes 法计算出被测器件(DUT)的 PDL.图 1 给出了 Agilent81910A 全光子参量测试仪中有关光器件 PDL 的测试原理图.测量 DGD 时加进了矢量探测器,矢量探测器由偏振束分配器和两个光功率计构成,偏振束分配器将从干涉仪

输出的两个正交分量分离出来,通过对输入光的两个已知偏振态的所有波长的扫描,可以解得被测器件的琼斯矩阵,解出琼斯矩阵后可以用本征值的差导出被测器件的 DGD.

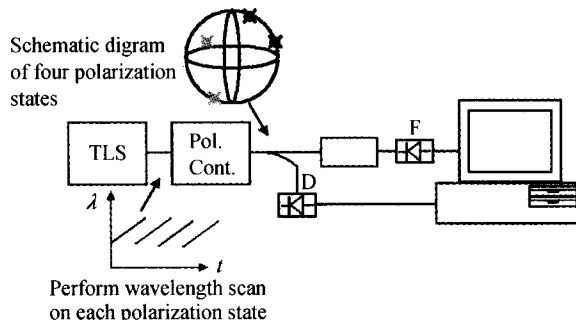


图 1 平面波导器件偏振相关损耗测量原理图

Fig. 1 Schematic diagram of measurement for PDL of plane waveguide devices

2 InP/In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}MQW 的性能测试分析

本文生长 InP/InGaAsP-MQW 材料设备用的是 EPI 公司的 Gen II 型 GSMBE 设备,因为 GSMBE 采用砷烷和磷烷等气态源代替普通分子束外延(MBE)中使用的固态砷和磷源,因而可以像 MOCVD 一样有效地控制外延层中 V 族元素(砷和磷)的组分;结合在线测量仪器对外延过程实施精确的控制.特别适合制备磷化物的超薄多层结构材料.

一般光调制器/开关用 MQW 结构的设计遵循下面两个原则:

1)量子阱的个数选取:量子阱数目少,量子阱的光吸收系数小,调制深度也小,因此调制器的长度加长,而且器件的高温特性变差;而量子阱数过多,调制器的长度虽可减小,高温特性也好,但厚度增大,调制电压也相应增大;2)阱材料组分和厚度的选取:主要由工作波长决定材料的组分,而应变量子阱的厚度一般在 4~8 nm,本文设计的 EAM 的工作波长在 1.55 μm ;综合起来,本文选取了有 10 个量子阱层厚度为 10.6 nm 和 11 个垒层厚度为 7.6 nm 的应变 InP/InGaAsP-MQW 周期结构.

生长了两个不同组分比的有 10 个量子阱层和 11 个垒层的 In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}-MQW 材料,以便选择出与工作波长 1.55 μm 相一致的带隙波长.缓冲层的厚度为 0.9 μm ,对所生长的样品做了光致发光谱(PL,在 10K 温度下)测量.表 1 给出了两个样品的组分比、禁带宽度、晶格常量、晶格失配度和带隙波长等数值.由表 1 可见,样品 2 的带隙波长在 1.58 μm ,接近设计的工作波长 1.55 μm ,而 1# 样品的带隙波长在 1.69 μm .

表 1 In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y} 多量子阱样品组分比、带隙波长、禁带宽、晶格失配度

样品	X(组分)	Y(组分)	禁带宽 E _g /eV	a(晶格常量 0.1 nm)	Δa/a 晶格失配度	λ(带隙波长 μm)
1#	well	0.47	1	0.734	5.868	-2.89×10 ⁻⁴
	barrer	0.077	0.325	1.053	5.899	0.0101
2#	well	0.689	0.311	0.802	5.846	-0.0079
	barrer	0.077	0.325	1.053	5.899	0.0101

用日本产 Rigaku SLX-1A X 射线双晶衍射仪, 分析、测试了所生长的 InP/InGaAsP-MQW 的阱/垒的厚度和应力的大小. 图 2(a)给出了 1# 样品的 InP/InGaAsP-MQW 的双晶衍射图. 由图可见, 1# 样品的 0 级卫星峰的位置与 InP 衬底的(004)衍射峰几乎重合, 说明该样品的 MQW 与衬底匹配的较好, 实际测试 MQW 与衬底间呈现的是平面双轴压应变状态, 压应变量为 115(ppm), 量子阱的厚度为 17±0.6 nm.

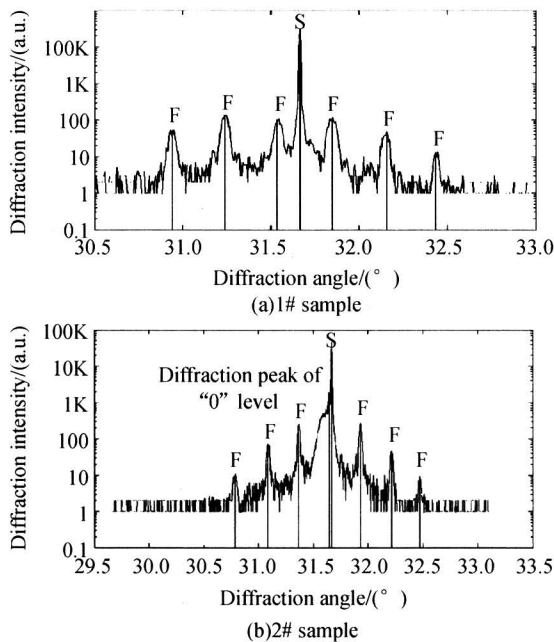


图 2 样品的双晶衍射图
Fig. 2 Bicrystal diffraction diagram

图 2(b)为 2# 样品的双晶衍射测量结果. 由图可见, 2# 样品的 0 级衍射峰的位置与衬底 InP 的(004)衍射峰有很小的间隔, 说明 2# 样品与衬底的匹配不如 1# 样品好, 但仍然远小于失配度为 1.5% 的临界值. 0 级衍射峰的位置偏左, 说明 2# 样品的 MQW 与衬底间也呈平面双轴压应变状态, 测试分析的压应变量为 476(ppm); 量子阱的厚度为 17.1±0.3 nm.

3 M-Z 型 InP/InGaAsP-EAM 的 PDL 测试

图 3 为 M-Z 型 InP/InGaAsP-EAM 调制器相应的扫描电镜照片和单模脊波导的端面照片. 该调制器的电极设计成行波型并有 50Ω 的匹配电阻, 器件两端带有宽为 8 μm 的模斑转换器(SSC), 器件长

为 3000 μm, 行波电极的有效作用长度为 500 μm. 器件测试所用的对准装置为英国产的 MG17AMB003/MD 三维微调架, 该三维微调架附带有固定光纤的 V 形槽配件: MG17HFV002.

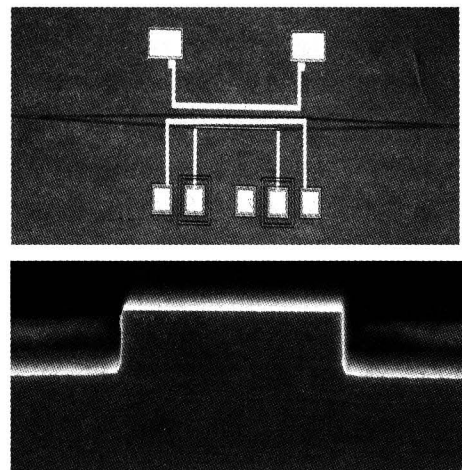


图 3 M-Z 型 InP/InGaAsP-EAM 和相应的单模脊波导端面扫描电镜照片
Fig. 3 M-Z type InP/InGaAsP-EAM and corresponding single mode ridge waveguide end face SEM

图 4 给出了用两个 InP/InGaAsP-MQW 样品

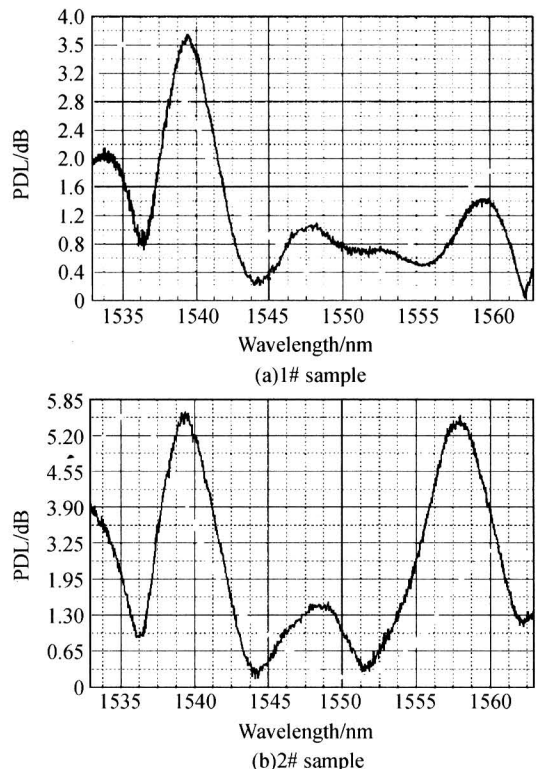


图 4 MQW-OM/S 的 PDL
Fig. 4 PDL of MQW-OM/S

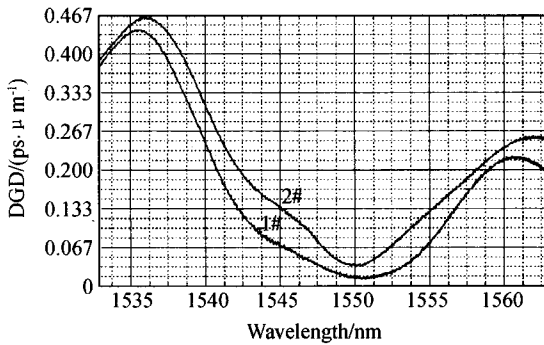


图5 两个样品材料制作的OM/S的GDG

Fig. 5 GDG of OM/S made of two sample materials

制作的OM/S的PDL测试结果. 由图可见, 用1#样品材料制作的OM/S的PDL比用2#材料制作的OM/S要小, 这是因为1#MQW材料与衬底间的应力比2#MQW与衬底间的应力小的缘故. 图5相应地给出了由两个样品制作的OM/S的DGD的测试结果. 由图4、图5可明显地看到, 光器件的PDL与GDG的对应关系. 两个样品制作的OM/S在工作波长1.55 μm处的PDL和DGD都比较小.

4 结论

半导体光器件中波导芯层与衬底间的残存应力是本身固有的, 本文采用Agilent公司的81910A光子全参量测试仪, 实验研究了InP/In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}P_y-MQW材料与衬底间因存在应力而对M-Z型光调制器产生的PDL影响以及由此引起的由DGD表征的PMD. 实验研究结果表明, 半导体MQW-OM/S的PDL与DGD是一致的. 因此在半导体光器件的制作过程中, 应尽可能地减小衬底与波导芯层之间的因残存应力的存在造成对光器件的高速性能的不利影响, 这对器件的制作工艺以及后期封装都提出了更高的要求.

参考文献

- Gisin N. Statistics of polarization dependent losses. *Opt Comm*, 1995, **114**(5-6): 399~405
- Yan L S, Yu Q, Luo T, *et al.* Deleterious system effects due to low-frequency polarization scrambling in the presence of nonnegligible polarization - dependent loss. *IEEE Photon Techno Lett*, 2003, **15**(3): 464~466
- Gisin N, Huttner B. Combined effects of polarization mode dispersion and polarization dependent loss in optical fibers. *Opt Comm*, 1997, **142**(1-3): 119~125
- Kim Na Young, Lee Duckey, Yoon Hosung, *et al.* Limitation of PMD compensation due to polarization-dependent loss in high-speed optical transmission links. *IEEE Photon Technol Lett*, 2002, **14**(1): 104~106
- Marc C, De Lignie, Huub G J, *et al.* Large polarization mode dispersion in fiber optical cables. *IEEE J Lightwave Techno*, 1994, **12**(8): 1325~1329
- 李炳辉, 韩汝琦, 王阳元. GeSi/Si应变异质结构应变和应力分布的模型研究. *半导体学报*, 1996, **17**(2): 81~87
Li B H, Han R Q, Wang Y Y. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1996, **17**(2): 81~87
- 李晓峰, 张景文, 高鸿楷, 等. 透射式GaAs光电阴极AlGaAs/GaAs外延层内应力的种类及其表征与测量. *光子学报*, 2002, **31**(1): 88~92
Li X F, Zhang J W, Gao H K, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(1): 88~92
- 李晓峰, 张景文, 高鸿楷, 等. 透射式GaAs光电阴极AlGaAs/GaAs外延层X射线衍射摇摆曲线半峰宽研究. *光子学报*, 2002, **31**(1): 93~96
Li X F, Zhang J W, Gao H K, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(1): 93~96
- 黄腾超, 沈亦兵, 侯西云, 等. K~+Na~+二次离子交换制作玻璃波导. *光子学报*, 2003, **32**(11): 1325~1328
Huang T C, Shen Y B, Hou X Y, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(11): 1325~1328
- Azzam R M A, Bashara N M. *Ellipsometry and Polarization Light*. New York: Norht-Holland Publishing Company, 1977. 96~97

Study of Polarization Dependent Loss on Performances of InP/InGaAsP-EAM Based on M-Z Interferometer

Cai Chun^{1,2}, Liu Xu¹, Xiao Jinbiao¹, Ding Dong¹, Zhang Mingde¹, Sun Xiaohan¹

Research Laboratory of Photonics and Optical Communication, Southeast University, Nanjing 210096

Received date: 2005-08-30

Abstract Polarization Dependent Loss (PDL) accumulated by devices such as optical modulators, switches, filters, isolators in fiber-optic communications system remarkably degraded the transmission property of the whole link so that PDL of passive components became an important specification parameter. PDL of M-Z modulator influenced by stress between InP/In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}P_y-MQW and its substrate and hence the Polarization Mode Dispersion (PMD) represented by Differential Group Delay (DGD) were first experimentally observed by Agilent 81910A Photonic All Parameter Analyzer. The outcome shows PDL and DGD of semiconductor Multiple-Quantum-Well (MQW) are consistent. During the fabrication of semiconductor optical devices, the residual stress between InP/In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}P_y-MQW and its substrate should be lessened as greatly as possible to avoid its impact on high speed optical devices' performance.

Keywords InP/InGaAsP; Polarization-dependent loss (PDL); Stress; Differential group delay (DGD); Multiple quantum well (MQW); Stokes model



Cai Chun was born in 1963. He is an associate professor. He received the Ph. D. degree from Southeast University and his research interests include optical waveguide theory, numerical methods, and integrated optical and devices.