

文章编号: 0258-7025(2003)08-0691-04

偏振无关集成光学模反射镜的研制

谢海宴¹, 胡鸿璋¹, 张胜甲¹, 耿 凡²

(¹ 天津大学理学院应用物理系, 天津 300072; ² 航天机电总公司 8358 研究所, 天津 300192)

摘要 根据双模干涉理论分析了集成光学反射镜的原理,并用光束传播法(BPM)计算了反射镜的反射特性以及对波长变化的适应性,通过对反射镜的结构参数进行优化,设计了一种与偏振无关的反射镜,其反射比大于 20 dB (99%)。实际制作了这种反射镜,实验测量表明,TE/TM 模的反射比均在 18.5 dB 以上。

关键词 应用光学;集成光学;反射镜;双模干涉;光束传播法

中图分类号 TN 256 **文献标识码** A

Study and Fabrication of Integrated Optical Polarization-independent Reflector

XIE Hai-yan¹, HU Hong-zhang¹, ZHANG Sheng-jia¹, GENG Fan²

(¹ Applied Physics Department, College of Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China)
(² The 8358th Institute, China Spaceflight Industry Corporation, Tianjin 300192, China)

Abstract An integrated optical polarization-independent reflector on LiNbO₃ using Ti-diffusion has been proposed according to the theory of two-mode interference in this paper. Its principle has been analyzed. With the beam propagation method (BPM), the reflecting characteristic and adaptability with the wavelength change of the reflector have been accurately calculated. By optimizing its configuration parameters, the reflecting ratio is more than 20 dB (99%). Some actual samples have been fabricated and the measured reflecting ratios of both TE/TM mode have reached more than 18.5 dB in the experiment.

Key words applied optics; integrated optical reflector; two-mode interference; beam propagation method (BPM)

1 引 言

集成光学中常常需要实现多级器件的无偏振损耗的级联。如果直接用波导连接多级器件,会大大增加整体器件的长度,导致集成度降低,而且会增加器件的制作难度,同时还不能保证波导的均匀性。另一种方法是在同一样品上制作两个平行的器件,再用弯曲波导相连,但是曲率较大的弯曲波导的损耗很严重。采用反射镜则能很好地满足这一要求。

本文应用双模干涉原理,设计了一种与偏振无关的集成光学模反射镜。采用光束传播法(BPM)^[1]法进行理论上的模拟计算,TE/TM 导模

的反射比均大于 20 dB。此外,它还具有很好的波长适应性。同时制作了相应的实际器件,测试结果表明,TE/TM 模的反射比均在 18.5 dB 以上,能够满足实际应用的要求。这种反射镜能够很好地连接两条钛扩散 LiNbO₃ 波导,且传输损耗小,可以有效地提高 LiNbO₃ 基片的集成度,在集成光学器件中,特别是在需要多级级联的器件^[2]中有着很高的应用价值。

2 理论和设计

偏振无关集成光学反射镜的具体结构如图 1

收稿日期:2002-05-08;收到修改稿日期:2002-06-19

基金项目:国家自然科学基金(编号:10084001)资助项目。

作者简介:谢海宴(1978—),女,江苏盐城人,天津大学理学院应用物理系硕士研究生,主要从事集成光学研究。E-mail: thanksxie@eyou.com

(a)所示。它由两部分组成：一个 Y 结分叉波导和一段 $14\ \mu\text{m}$ 宽的双模波导，并在其末端镀上对波长为 $1.55\ \mu\text{m}$ 光波的高反射膜。当 TE/TM 光波从端口 1 入射传播到端口 2 时，器件的作用相当于一个如图 1(b)所示的零间隙耦合器，从端口 1 入射的 TE/TM 模均又通从端口 4 出射。作用原理可以用双模干涉理论^[3]来解释：当 TE/TM 模通过端口 1 入射后，波导中会激起两个导模——基模和一阶模，可以把它们看作是 关于反射镜水平中心线的对称模和反对称模。因为在 Y 结部分波导的间距沿径向不断变化，这两个导模的传播常数就不是确定的数值，设其位相差为 $\Delta\phi_i$ ；在双模波导部分，也有两个导模存在，但它们均有确定的模传播常数，设其传播

常数差为 $\Delta\beta_c$ ，通过 BPM 法可以求出： $\Delta\beta_{\text{TE}} = 0.009817$ ， $\Delta\beta_{\text{TM}} = 0.0043$ 。在整个作用区域这两个导模要发生干涉。若设反射镜的中心作用区长度为 L_c ，当满足下列条件^[3]

$$\Delta\phi(L) = \Delta\beta_c L_c + 2\Delta\phi_i = \begin{cases} n\pi, & \text{TE} \\ m\pi, & \text{TM} \end{cases} \quad (1)$$

且 $|n - m| = 2k \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots$ 时，TE/TM 模的对称模和反对称模同时在作用区末端发生相消或相长干涉。为了让 TE/TM 模均又通从端口 4 出射，两模的位相差应均为 π 的奇数倍^[4,5]，即 n, m 同取奇数。此时相当于 TE/TM 模同时从反射镜的端口 2 出射，从而实现从一条波导到另一条波导的模式反射。

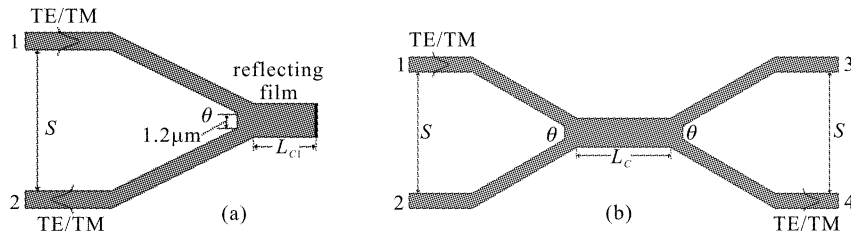


图 1 反射镜

(a) 结构示意图；(b) 原理示意图

Fig. 1 Reflector

(a) configuration of the reflector; (b) principal sketch of the reflector

由于 $\Delta\beta_c$ 是常数， $\Delta\phi_i$ 只与 θ 有关，所以 $\Delta\phi(L)$ 只是 L_c 和 θ 的函数。图 2 为 L_c 和 θ 的关系曲线，图中的 n, m 同为奇数。只有当两组平行的曲线有交点时，才能同时满足(1)式，实现 TE/TM 模从一个端口到另一个端口的反射。为了减少反射镜的长度，应尽量使 n, m 的值较小。从图中可以看出，当 $n = 5, m = 3$ 时，有交点坐标 $(0.46, 960)$ ，故反射镜最主要的两个结构参数分别为：分叉角 $\theta = 0.46^\circ$ ，双模波导的长度 $L_c = 960\ \mu\text{m}$ 。

反射镜最重要的性能指标是模反射比

$$\eta_{\text{TE, TM}} = 10 \lg \frac{P_2}{P_1} \quad (2)$$

其中， P_1, P_2 分别指端口 1, 2 的 TE/TM 模的输出光功率。通过 BPM 法计算，TE/TM 模的反射比均大于 20 dB。

为了实际应用于 WDM 通讯系统，如不依赖于偏振的集成光学声光可调谐滤波器，反射镜的反射比随波长的关系也是一个重要的性能指标，经计算可知传导损耗随波长的变化浮动很小，具有良好的波长稳定性。

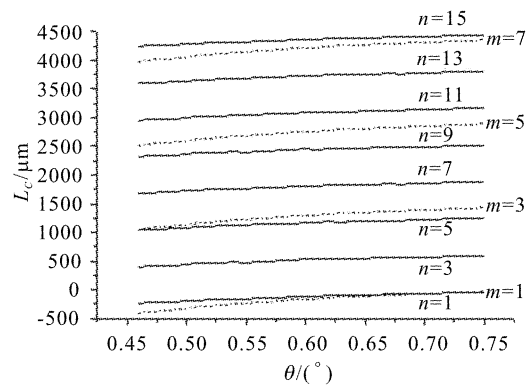


图 2 用 BPM 法算得的反射镜中心作用长度 L_c 与分叉角 θ 的关系曲线

Fig. 2 BPM-calculated length of the central segment as a function of the branching angle

3 器件制作与实验测量

集成光学反射镜的制作选用 x 切 LiNbO_3 晶体做基底材料。制作过程如下：在经过彻底清洗的 LiNbO_3 基片上用光刻、剥离工艺溅射上若干形状如图 1(a)所示的钛条，厚度为 110 nm。然后在

1050 °C 高温中扩散 9 h, 再将两端面抛光。在抛光要镀膜的这一端面, 需要对抛光长度精确控制。因此, 我们在两侧做上光栅作为标尺, 随时监控抛光进行的过程, 严格控制中心作用区域的长度, 以保证 L_c 的误差不超过 $5 \mu\text{m}$ 。最后在端面镀上高反膜, 这里采用的是金膜。

首先要测量金膜的反射率。实验装置如图 3, 波长为 $0.6328 \mu\text{m}$ 的 He-Ne 激光作为准直光, $1.523 \mu\text{m}$ 的激光进入 3 dB 光纤耦合器的 1 端口。设耦合器的透过率为 T , 4 端口处耦合的效率为 r , 镀膜处反射率为 R 。作为比较, 先测量没有镀金膜时的反射率 R_1 。设入射光强 I_0 , 从 2 端口出射光强为 $I_{\text{out}1}$, 此时有

$$I_{\text{out}1} = I_0 \cdot T \cdot r \cdot R_1 \cdot r \quad (3a)$$

取对数

$$\lg I_{\text{out}1} = \lg I_0 + \lg T + 2\lg r + \lg R_1 \quad (3b)$$

然后测量镀金后的反射率 R_2 , 同样有

$$I_{\text{out}1} = I_0 \cdot T \cdot r \cdot R_2 \cdot r \quad (4a)$$

$$\lg I_{\text{out}1} = \lg I_0 + \lg T + 2\lg r + \lg R_2 \quad (4b)$$

式(4b)减去式(3b), 得

$$\lg \frac{I_{\text{out}2}}{I_{\text{out}1}} = \lg \frac{R_2}{R_1} \quad (5)$$

其中, $R_1 = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 = 13.6\%$, n 为基底折射率。从耦合器的 3 端口可以很容易地监测出 $I_{\text{out}1}$ 和 $I_{\text{out}2}$, 代入(5)式即可求出 R_2 。多次测量的结果可得 $R_2 > 90\%$ 。

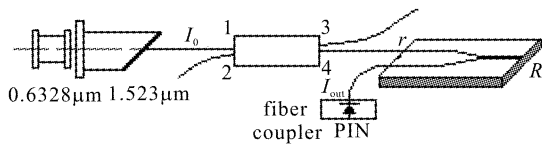


图 3 测量金膜反射率的实验装置示意图

Fig. 3 Experimental set-up for the measurement of reflecting ratio of the Au film

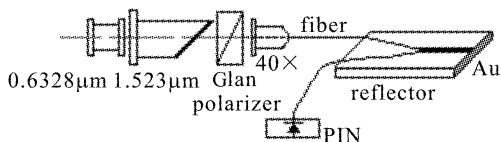


图 4 测量反射镜反射比的实验装置示意图

Fig. 4 Experimental set-up for the measurement of reflecting ratio of the reflector

针对分叉角度 $\theta = 0.44^\circ \sim 0.48^\circ$, 制作了一系

列不同 L_c ($890 \sim 990 \mu\text{m}$) 的反射镜样品, 并在其出射端接出尾纤。测量模反射比的实验装置如图 4 所示。波长为 $1.523 \mu\text{m}$ 的激光经起偏器后就可获得 TE 或 TM 偏振光, 再经过透镜聚焦后, 由单模光纤直接耦合入反射镜的入射端口, 从出射端口 2 输出的出射光用带尾纤的 PIN 探测。

实验测得的最佳结果如图 5(a) 所示(已除去金膜反射损耗)。最佳结构参数为 $\theta = 0.48^\circ, L_c = 960 \mu\text{m}$, 此时最平均的反射比为 16.4 dB(TM) 和 18.3 dB(TE) , 还不能满足我们的要求。由图中可以看出, TM 比 TE 先达到最大值。在图 2 中对应不同的 θ 划上竖线(即 θ 取值一定时, 不同 L_c 对应的反射比), TM 模比 TE 模先达到最大值的参数应该是处于比最佳理想值小的地方。所以增加 θ 值使 $\theta = 0.50^\circ$, 重新制作了一系列 L_c 值的样品, 结果如图 5(b)。最佳结构参数 $\theta = 0.50^\circ, L_c = 935 \mu\text{m}$, 最平均结果为 20.5 dB(TM) 和 18.5 dB(TE) , 而且附近的几组参数也都比较好, 可以认为是理想的结构参数。

由上面的分析可知, 理论最佳参数和实验中获得的参数略有不同, 这主要是因为实际制作过程中的工艺条件和理论计算时的工艺参数略有不同造成的。

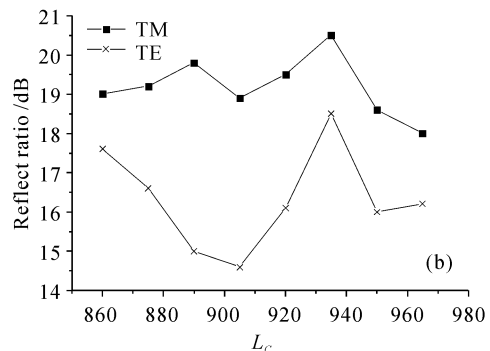
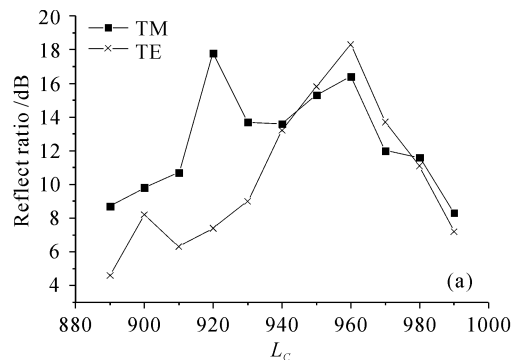


图 5 反射镜的实验结果

Fig. 5 Experimental results of the reflector
(a) $\theta = 0.48^\circ$; (b) $\theta = 0.50^\circ$

4 结 论

利用双模干涉理论分析了集成光学偏振无关的模反射镜的工作原理,优化设计了模反射镜的结构参数,并实际制作了这种反射镜,实验结果与理论符合得很好,并能够满足实际使用的要求。

参 考 文 献

- 1 M. D. Feit, J. A. Fleck, Jr.. Calculations of dispersion in graded-index multimode fibers by a propagating-beam method [J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(16):2843~2851
- 2 David A. Smith, Jane E. Baran, John J. Johnson *et al.*. Integrated-optic acoustically-tunable filters for WDM networks [J]. *IEEE. J. Selected Areas in Communications*, 1990, **8**(6):1151~1159
- 3 L. Bersiner, U. Hempelmann, E. Strake. Numerical analysis of passive integrated-optical polarization splitters; comparison of finite-element method and beam-propagation method results [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1991, **8**(2):422~433
- 4 D. Yap, L. M. Johnsoc, G. W. Pratt, Jr.. Passive Ti:LiNbO₃ channel waveguide TE-TM mode splitter [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1984, **44**(6):583~585
- 5 A. Neyer. Low-crosstalk passive polarization splitter using Ti:LiNbO₃ waveguide crossing [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **55**(10):20~22



量子光学与光量子器件国家重点实验室

量子光学与光量子器件国家重点实验室,是在原山西大学量子光学教育部重点实验室的基础上,于2001年8月通过国家科技部基础研究司组织的专家论证,2001年10月经国家科技部批准开始建设,并于2002年12月通过国家科技部组织的专家验收。依托单位是山西大学。

实验室的主要研究方向为:1)量子光学基础和应用:以量子物理学为理论基础,运用现代光学与光电子学的实验手段,开展光场的非经典性质、量子态的产生、非经典光场的产生机制研究,开拓非经典光场在量子信息、基本量子物理问题的检验等领域的研究,目前正在开展纠缠态的产生及利用纠缠态进行连续变量量子通讯的实验研究;2)光与原子相互作用:研究光与物质相互作用的基本量子现象,探索原子与光子作用的量子物理过程,进一步研究冷原子与光场作用过程中的量子现象,以期在获得超冷原子的基础上,实现单粒子水平上对光子与原子作用过程的观察和控制;3)全固化激光技术和光量子器件:完善高性能全固化单频激光器,研制可调谐光学参量振荡器、全固化小型光压缩器、量子纠缠态源等光量子器件。

量子光学与光量子器件国家重点实验室主任和副主任分别由张宽收教授、彭堃焯教授、贾锁堂教授担任,学术委员会主任和副主任由王育竹院士、彭堃焯教授担任。实验室以山西大学光电研究所为主

体,以山西大学电子信息系、物理系、理论物理研究所以及“国家理科基础科学研究与教学人才培养基地”(物理学)为依托,有国家重点建设学科光学学科的支撑。实验室始终坚持进行量子光学前沿课题的研究,同时以“攀登、奉献”的学风作为实验室建设的灵魂,注重学术梯队的培养,已形成一支稳定的老中青三结合的科研队伍。特别是具有博士学位、高级技术职称的中青年学术骨干均在国外优秀的实验室经过1到2年的博士后训练,现已独立承担科研课题并主持课题组的研究工作。

近五年来,实验室承担“国家重大基础研究计划(973)项目”子项目1项,完成并承担国家自然科学基金重点项目4项、海外杰出青年基金1项及面上项目16项,完成并承担省部级科研项目48项。在国际与国内重要学术刊物上发表论文200余篇。获国家技术发明二等奖1项、省部级科研成果一等奖2项、省部级科研成果二等奖6项、国家级教学成果二等奖1项,获国家发明专利授权2项。

实验室在建设中重视学术交流,在国际上先后与美国、法国、日本、澳大利亚、德国等国家的著名量子光学实验室建立了长期稳定的具有实质性的学术交流和学术互访关系。由中法互派学者访问的双边合作项目已经成功地进行了多年,取得了可喜的成果。