

基于 TE-TM 模变换的新型相位自补偿磁光隔离器^{*}

曾维友^{1)†} 谢康¹⁾ 姜海明¹⁾ 陈凯¹⁾

1) 电子科技大学光电信息学院, 成都 610054)

2) 湖北汽车工业学院理学部, 十堰 442002)

(2007 年 5 月 23 日收到, 2007 年 9 月 19 日收到修改稿)

讨论了由 45°非互易模变换器与 45°互易模变换器构成波导型光隔离器时两者之间须满足的条件, 并由此设计了一种新型的相位自补偿磁光隔离器. 利用全矢量有限差分光束传输法对隔离器进行仿真, 得到了插入损耗为 -1.2 dB, 隔离度为 -34 dB 的结果.

关键词: 集成光学, 磁光隔离器, 非互易模变换器, 互易模变换器

PACC: 4282, 7820L, 4280S

1. 引 言

在光纤通信技术中, 光路中额外的反射光会严重影响半导体激光器、光放大器等器件的工作稳定性, 从而影响通信质量, 因而需要光隔离器. 光隔离器是一种光非互易无源器件, 即光沿正向传输时具有较低的损耗, 而沿反向传输时却有很大的损耗, 因此它可以阻挡反射光对光源等的影响. 到目前为止, 用于此目的的商用光隔离器都属于体结构的微光学器件. 然而就像电子器件一样, 将光源、光放大器、光调制器等光器件单片集成在一起是必要的, 而光隔离器在这个集成器件中是必不可少的.

集成光隔离器的基本工作原理是基于 YIG 磁光薄膜的磁光法拉第效应^[1]. 在对集成光隔离器的研究中, 研究人员提出了多种方案, 主要有基于非互易 TE-TM 模变换型的光隔离器^[2,3]、非互易马赫-曾德耳干涉仪型光隔离器^[4,5]、非互易多模干涉型光隔离器^[6,7]、基于铁磁薄膜作包层的半导体放大器型光隔离器^[8]等等.

对于模变换型光隔离器, 其方案通常都是用 45°非互易模变换器与 45°互易模变换器构成. 45°非互易模变换器利用磁光效应实现, 而 45°互易模变换器可以利用非对称波导结构实现. 在以往的设计中, 研究人员都是采用各种方法使 45°非互易模变换器

与 45°互易模变换器的最大转换效率接近 100%. 但在波导中, 通常 TE 模与 TM 模的传输常数是不同的, 因此为了实现 100% 的最大转换效率, 就要使用相位匹配技术, 这给波导的设计及制作都带来了难度. 而且在这种设计中, 将 45°非互易模变换器与 45°互易模变换器直接组合在一起时其中一部分是不能实现模式转换的, 它们之间还必须用 90°的相位补偿器连接, 这不但增加了器件的长度, 同时也增加了制作上的难度.

本文设计的新型模变换型相位自补偿光隔离器, 其 45°非互易模变换器和 45°互易模变换器的最大模转换率都小于 100%, 即不需要使用相位匹配技术, 而且不需要 90°相位补偿器, 优越性比较明显.

2. 理论公式

在磁光波导中, 电磁场 E 所满足的波动方程为

$$\nabla^2 E - \nabla(\nabla \cdot E) + k_0^2 [\epsilon_r] E = 0, \quad (1)$$

其中 $k_0 = 2\pi/\lambda$ 是真空中波矢, λ 为波长. 当外加磁场平行于光的传输方向 z 轴时, 介电张量的形式可以表示为^[1]

$$[\epsilon_r] = \begin{bmatrix} n^2 & \epsilon_{xy} & 0 \\ \epsilon_{yx} & n^2 & 0 \\ 0 & 0 & n^2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 $\epsilon_{xy} = -\epsilon_{yx} = -j\delta$, $\delta = n\lambda\theta_F/\pi$, θ_F 为磁光介质

^{*} 国家自然科学基金(批准号 60588502 和 60607005)资助的课题.

[†] E-mail: zengweiyu@yahoo.com.cn

的比法拉第旋转角.

沿 z 轴传输的光场为

$$E(x, y, z) = [\hat{x}E_x + \hat{y}E_y + \hat{z}E_z] \exp(-j\beta z), \quad (3)$$

式中 $\beta = k_0 n_{\text{ref}} m_{\text{ref}}$ 为参考折射率. 设波导沿 z 轴分布均匀, 且光场沿 z 轴满足缓变条件

$$\frac{\partial n^2}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial^2}{\partial z^2} \ll j2\beta \frac{\partial}{\partial z}, \quad (4)$$

则将(2)式及(3)式代入方程(1), 可以推导出 x, y 分量满足的耦合波方程为

$$j2\beta \frac{\partial E_x}{\partial z} = A_x E_x + B_y E_y + C_{xx} E_x + D_{xy} E_y, \quad (5a)$$

$$j2\beta \frac{\partial E_y}{\partial z} = A_y E_y + B_x E_x + C_{yy} E_y + D_{yx} E_x, \quad (5b)$$

其中,

$$A_u E_u = \frac{\partial}{\partial u} \left[\frac{1}{n^2} \frac{\partial}{\partial u} (n^2 E_u) \right], \quad (6)$$

$$B_w E_w = \frac{\partial^2 E_w}{\partial w^2}, \quad (7)$$

$$C_{uu} E_u = (k_0^2 n^2 - \beta^2) E_u, \quad (8)$$

$$D_{uw} E_w = \frac{\partial}{\partial u} \left[\frac{1}{n^2} \frac{\partial}{\partial w} (n^2 E_w) \right] - \frac{\partial^2 E_w}{\partial u \partial w} + k_0^2 \epsilon_{uw} E_w, \quad (9)$$

其中 u, w 分别代表 x 或 y .

设计模变换型光隔离器的过程实际上就是求解耦合波方程(5)的过程. 本文利用的是全矢量有限差分光束传输法(finite difference beam propagation method, FD-BPM), 首先将方程(5)在 z 方向离散, 可得

$$\begin{aligned} & \left[1 - \frac{\Delta z}{j4\beta} (A_x + B_y + C_{xx}) \right] E_x^{l+1/2} \\ &= \left[1 + \frac{\Delta z}{j4\beta} (A_x + B_y + C_{xx}) \right] E_x^{l-1/2} \\ &+ \frac{\Delta z}{j2\beta} D_{xy} E_y^l, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & \left[1 - \frac{\Delta z}{j4\beta} (A_y + B_x + C_{yy}) \right] E_y^{l+1} \\ &= \left[1 + \frac{\Delta z}{j4\beta} (A_y + B_x + C_{yy}) \right] E_y^l \\ &+ \frac{\Delta z}{j2\beta} D_{yx} E_x^{l+1/2}, \end{aligned} \quad (11)$$

式中 Δz 为 z 方向的离散步长, l 为整数, 满足 $z = l\Delta z$. 离散过程中采用了交替网格, 因而在求解 E_x 时 E_y 是作为已知的; 同样, 在求解 E_y 时 E_x 也是已知的. 这样就避免了求解差分方程组的繁琐过程.

为了应用交替方向隐式(ADI)法, 文献[9]采用了引入高阶小量的方法. 对(10)式, 引入高阶小量后分解因式可得

$$\begin{aligned} & \left[1 - \frac{\Delta z}{j4\beta} \left(A_x + \frac{C_{xx}}{2} \right) \right] \left[1 - \frac{\Delta z}{j4\beta} \left(B_y + \frac{C_{xx}}{2} \right) \right] E_x^{l+1/2} \\ &= \left[1 + \frac{\Delta z}{j4\beta} \left(A_x + \frac{C_{xx}}{2} \right) \right] \left[1 + \frac{\Delta z}{j4\beta} \left(B_y + \frac{C_{xx}}{2} \right) \right] E_x^{l-1/2} \\ &+ \frac{\Delta z}{j2\beta} D_{xy} E_y^l, \end{aligned} \quad (12)$$

利用等式变换可将(12)式分离成如下二式:

$$\begin{aligned} & \left[1 - \frac{\Delta z}{j4\beta} \left(A_x + \frac{C_{xx}}{2} \right) \right] \phi_x^{l+1/2} \\ &= \left[1 + \frac{\Delta z}{j4\beta} \left(A_x + \frac{C_{xx}}{2} \right) + \frac{\Delta z}{j2\beta} \left(B_y + \frac{C_{xx}}{2} \right) \right] E_x^{l-1/2} \\ &+ \frac{\Delta z}{j2\beta} D_{xy} E_y^l, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & \left[1 - \frac{\Delta z \eta}{j2\beta} \left(B_y + \frac{C_{xx}}{2} \right) \right] E_x^{l+1/2} \\ &= \phi_x^{l+1/2} - \frac{\Delta z}{j4\beta} \left(B_y + \frac{C_{xx}}{2} \right) E_x^{l-1/2}, \end{aligned} \quad (14)$$

(13)和(14)式在 x, y 方向离散后均是三对角方程, 可用比较高效的追赶法求解. (11)式也可用同样的方法将其分解为两个三对角方程, 然后用追赶法求解. 通过这样的交替求解, 就可以求出所有的 E_x 和 E_y , 从而也就知道了光在波导中的传播状况. 波导中光场的相位可由 $\theta_i = \arctan[\text{Im}(E_i)/\text{Re}(E_i)]$ ($i = x, y$) 求出.

3. 新型模变换型光隔离器的设计与仿真

使 45° 非互易模变换器与 45° 互易模变换器两者直接组合在一起时都能实现模式转换的内在原因是两者之间模式的相位依赖关系. 首先将 TE-TM 模的相位依赖关系记为 $\varphi = \theta_x - \theta_y$ (θ_x, θ_y 为光场中心点的相位). 非互易模变换器的相位依赖关系用 φ_1 表示, 互易模变换器的相位依赖关系用 φ_2 表示, 并令 $\Delta\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$. 当非互易模变换器、互易模变换器在相位失配时, φ_1 与 φ_2 是传输距离的函数. 经过对相位依赖关系的研究本文发现, 如果非互易模变换器与互易模变换器在 TE-TM 模转化率为 50% 处的相位依赖关系满足下述条件, 那么将 45° 非互易模变换器与 45° 互易模变换器直接连在一起就会出现以下两种情况: 1) $\Delta\varphi_0 = n\pi$ ($n = 0, \pm 1, \dots$), 光场从前

一模式变换器传输到后一模式变换器时可以继续转化，转化率为 100%，即偏振面可以继续旋转 45°；
 2) $\Delta\varphi_0 = n\pi/\lambda$ ($n = \pm 1, \pm 3, \dots$)，光场从前一模式变换器传输到后一模式变换器时不能继续转化，即偏振面保持不变。如果设后一模式变换器某一模式的初始输入功率为 P_0 ，这一模式的输出功率为 P_1 ，将模式转换率定义为 $Q = |P_1 - P_0|/P_0$ ，则 Q 与相位的关系可表示为

$$Q = |\cos(\Delta\varphi)|, \quad (15)$$

本文设计的磁光隔离器是由埋入型波导构成的，波导由 Ce:YIG 材料构成，周围介质为 GGG 材料，参数来自文献 [10] 即 1.55 μm 波长处 Ce:YIG 折射率为 $n_1 = 2.21$ ，比法拉第旋转角 $\theta_F = -4800 \text{ deg/cm}$ ，GGG 的折射率为 $n_2 = 1.93$ 。互易模式变换器的波导折射率取 2.21。图 1 为非互易模式变换器与互易模式变换器的结构截面示意图。

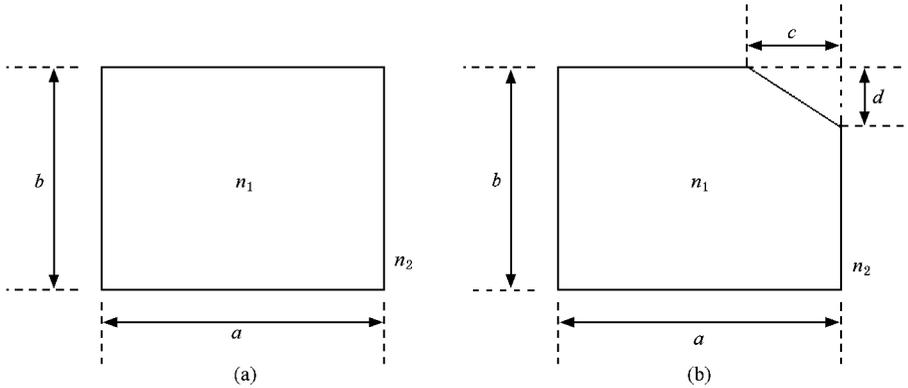


图 1 模式变换器结构截面示意图 (a) 非互易模式变换器；(b) 互易模式变换器

非互易模式变换器的几何参数为 $a = 0.66 \mu\text{m}$ ， $b = 0.6 \mu\text{m}$ 。互易模式变换器的几何参数为 $a = 0.66 \mu\text{m}$ ， $b = 0.6 \mu\text{m}$ ， $c = d = 0.21 \mu\text{m}$ 。分别对非互易

模式变换器及互易模式变换器进行仿真，其振幅及相位的结果如图 2 和图 3 所示。

从仿真结果得出：非互易模式变换器在转化率为

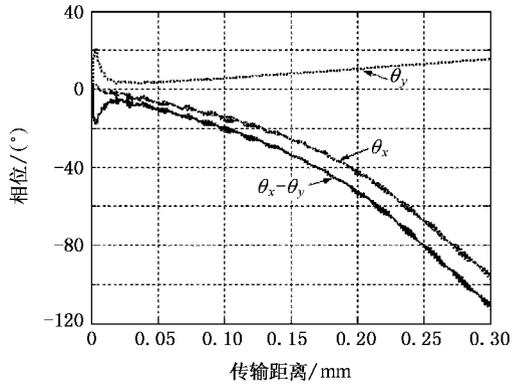
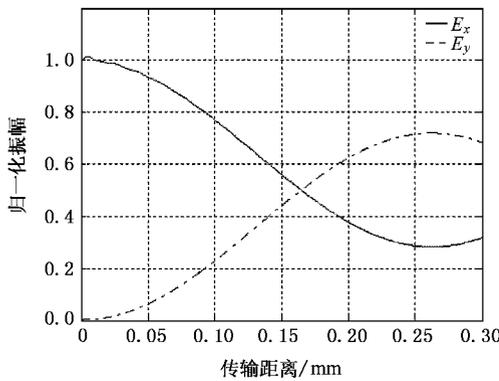


图 2 非互易模式变换器的振幅及相位关系仿真结果

50% 处的相位关系 $\theta_x - \theta_y$ 为 -40° ，传输距离为 170 μm ；互易模式变换器在转化率为 50% 处的相位关系 $\theta_x - \theta_y$ 为 -140° ，传输距离为 208 μm 。根据前面得出的非互易与互易模式变换器之间相位关系的结论可知，直接将这两种模式变换器接在一起是可以实现 TE-TM 模式的完全转化的。图 4 是 45°互易模式变换器、45°非互易模式变换器组合后的仿真结果，结果表

明正向传输时输入 E_x ，输出仍为 E_x ，转化率接近 100%；反向传输时输入 E_x ，输出为 E_y ，转化率也是接近 100% 的。这与前面的结论是一致的。

模式变换型隔离器是工作在单一模式下的，构成隔离器时还需要在前端及后端加上偏振器。因而此种隔离器主要由四部分组成：前端及后端的偏振器、45°互易模式变换器、45°非互易模式变换器。其结构示意图

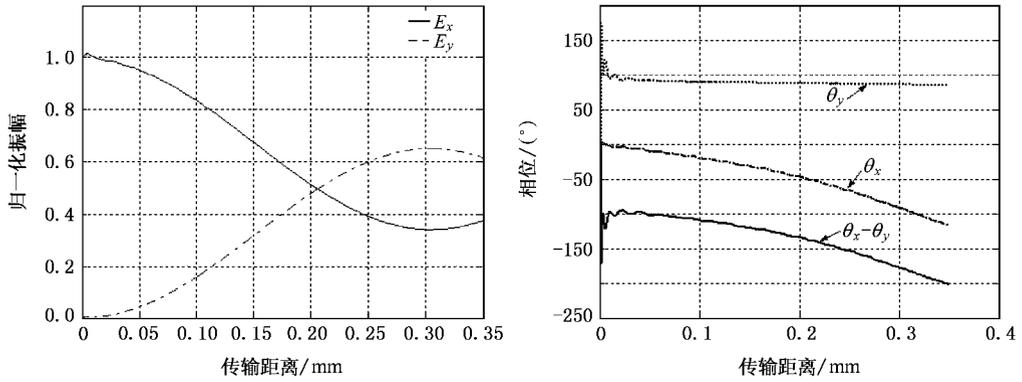


图 3 互易模变换器的振幅及相位关系仿真结果

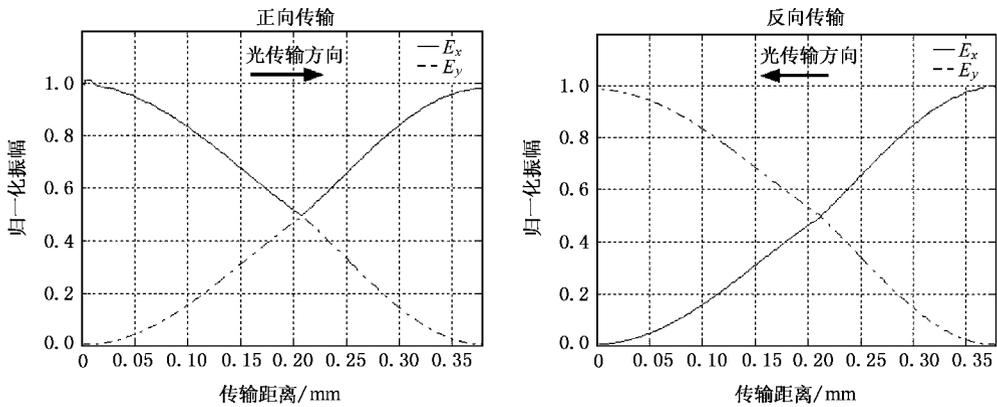


图 4 45°互易模变换器与 45°非互易模变换器组合后的仿真结果

图如图 5 所示。

偏振器的几何参数与非互易模变换器相同,材料参数如下:介质折射率为 1.93,TE 模的波导折射率为 2.21, TM 模为 $2.21 - j * 0.002$ 。用全矢量 FD-BPM 对隔离器进行仿真,输入 E_x ,当偏振器长度为 $955 \mu\text{m}$ 时,隔离度达到 -34 dB ,其结果如图 6 及图 7 所示。仿真结果表明插入损耗为 -0.6 dB ,将其他传输损耗计入,总的插入损耗约 -1.2 dB 。相位关系在输入端及输出端部分不稳定,这主要是由于在这两部分 TM 模或 TE 模的强度很弱,低于噪声极限

所引起的。

改变计算参数,如波长取 $1.51 \mu\text{m}$,衬底折射率取 1.945,非互易模变换器波导折射率 2.22,比法拉第旋转角 $\theta_F = -4800 \text{ deg/cm}$;互易模变换器波导折射率 2.22;偏振器的波导折射率为 TE 模 2.22, TM 模 $2.22 - j * 0.002$ 。此时得到的隔离度为 -30 dB ,插入损耗为 -1.8 dB 。插入损耗增大的原因在于波导参数改变后 TE-TM 模的转化已不完全。这说明该结构对波导参数较为敏感,带宽受到一定限制,如何优化波导结构使其有较大的带宽,这一问题还需进一

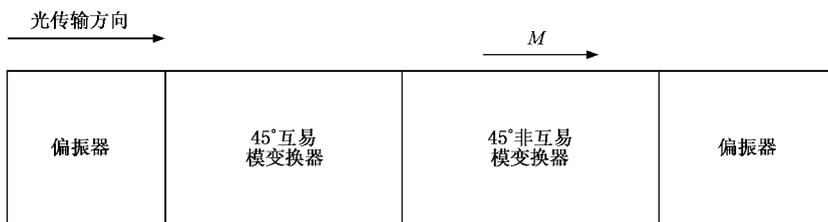


图 5 相位自补偿隔离器的结构组成方框图

步研究. 另外, 在上面的仿真中, 互易模变换器与非互易模变换器均是磁光材料, 只是假定互易模变换器没有被磁化, 如何保证互易模变换器不被磁化这

是实际制作中有待解决的一个关键问题, 如果互易模变换器采用非磁光材料, 则互易模变换器与非互易模变换器之间会因为折射率的差异而使耦合损耗

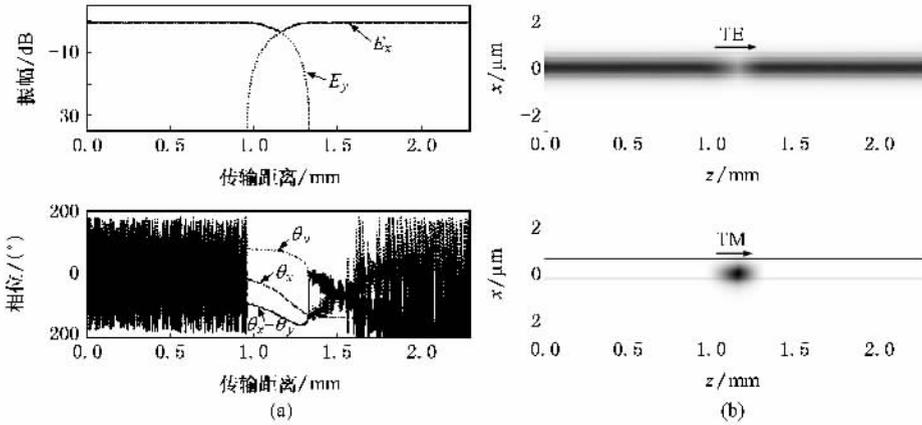


图 6 正向光传输情况 (a) 振幅及相位关系 ;(b) 光强分布

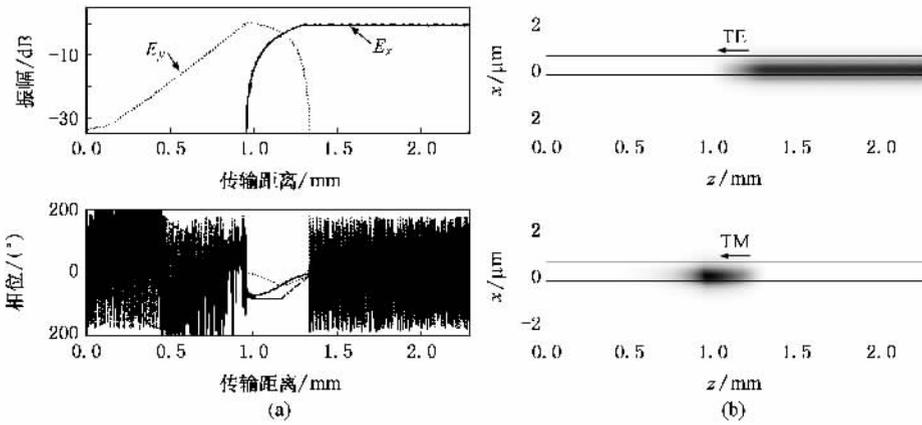


图 7 反向光传输情况 (a) 振幅及相位关系 ;(b) 光强分布

增大, 这也是一个需要考虑的问题.

4. 结 论

本文给出了由互易与非互易模变换器构成波导

光隔离器时两者光场需满足的相位依赖关系, 并据此设计了一种 TE-TM 模之间不需要满足相位匹配关系的隔离器. 仿真结果表明, 该隔离器的隔离度为 -34 dB, 总的插入损耗为 -1.2 dB, 实现了隔离器的功能, 证实了这种设计方案的可行性.

[1] Yamamoto S, Makimoto T 1974 *J. Appl. Phys.* **45** 882
 [2] Castera J P, Hapner G 1977 *IEEE Trans. Magn.* **13** 1583
 [3] Holmes B M, Hutchings D C 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 61116
 [4] Fujita J, Levy M, Osgood R M Jr, Wilkens L, Dotsch H 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 2158
 [5] Mizumoto T 2004 *OFC TuE5*
 [6] Yang J S, Roh J W, Ok S H, Woo D H, Byun Y T, Lee W Y, Mizumoto T, Lee S 2005 *IEEE Trans. Magn.* **41** 3520
 [7] Lohmeyer M, Wilkens L, Zhuromskyy O, Dotsch H 2001 *Opt. Commun.* **189** 251
 [8] Vanwolleghem M, Van Parys W, Van Thourhout D, Baets R, Lelarge F, Gauthier-Lafaye O, Theureau B, Wirix-Speetjens R,

Lagae L 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 3980

Lightwave Technol. **23** 2579

[9] Alcantara L D S , Teixeira F L , César A C , Borges B H V 2005 *J.*

[10] Shintaku T , Uno T , Kobayashi M 1993 *J. Appl. Phys.* **74** 4877

A novel phase self-compensation isolator based on TE-TM mode conversion^{*}

Zeng Wei-You^{1,2,†} Xie Kang¹⁾ Jiang Hai-Ming¹⁾ Chen Kai¹⁾

¹ *School of Optoelectronic Information , University of Electronics Science and Technology , Chengdu 610054 , China*)

² *Hubei University of Automotive Technology , Shiyan 442002 , China*)

(Received 23 May 2007 ; revised manuscript received 19 September 2007)

Abstract

The intrinsic factors of magneto-optical waveguide isolator based on 45° nonreciprocal mode conversion and 45° reciprocal mode conversion are introduced. A novel phase self-compensation isolator is designed and simulated by the full-vectorial FD-BPM. The insertion loss of this isolator is -1.2 dB and the isolation is -34 dB.

Keywords : integrated optics , magneto-optical isolator , nonreciprocal mode conversion , reciprocal mode conversion

PACC : 4282 , 7820L , 4280S

^{*} Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60588502 and 60607005).

[†] E-mail : zengweiyou@yahoo.com.cn