

TE-TM 模变换型光波导隔离器的理论研究*

曾维友^{1)†} 谢康²⁾ 陈伟¹⁾ 毛书哲¹⁾

1) (湖北汽车工业学院理学系, 十堰 442002)

2) (合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 合肥 230009)

(2011年10月20日收到; 2011年12月16日收到修改稿)

利用微扰理论研究了 TE-TM 模变换型光波导隔离器的自相位补偿. 从相位同步和功率转换解释了这种器件的工作原理, 揭示了两个模转换器相位失配与模转换比例的关系, 数值仿真结果与理论分析相符, 证实了模变换型光波导隔离器中的自相位补偿理论.

关键词: 磁光隔离器, 非互易光传输, 相位匹配

PACS: 42.82.-m

1 引言

在光纤通信技术中, 光路额外的反射光会严重影响光源等有源器件的工作稳定性, 降低通信质量. 光隔离器是只允许光单向传输的非互易器件, 可以阻挡反射光对光源等的影响. 目前商用的光隔离器都是体型结构的微光学器件, 然而将光源, 光隔离器等单片集成在一起是必要的, 有利于提高器件的工作性能.

在对集成光隔离器的研究中, 人们提出了多种方案, 如基于非互易 TE-TM 模转换^[1], 基于非互易 Mach-Zender 干涉仪^[2], 基于非互易多模成像^[3]的隔离器等. 文献[4—6]还对多层膜结构的磁光隔离器进行了研究和分析.

基于 TE-TM 模转换的隔离器其思想源于体型光隔离器中的法拉第磁光旋转, 但在波导器件中, TE, TM 模的传输常数不同, 存在相位失配. 许多研究者都曾试图解决 TE, TM 模之间的相位失配, Wolfe 等^[7]提出了优化波导结构的方案, Holmes 等^[8]提出了准相位匹配的方案, 但这些方法在设计 and 制造波导时都比较困难, 公差要求也很高. 即使解决了相位失配, 在组成隔离器时也还必须在非

互易与互易模转换器之间插入相位补偿器^[9].

Dammann 等^[10]设计了工作在相位失配条件下的波导隔离器, 但在他们的方案中, 光在通过起偏器及磁光波导后成为椭圆偏态, 只有一部光能够通过检偏器, 插入损耗较大. 另外, 两个偏振器成 45° , 难以在集成波导器件中实现. 有人分析过磁光 Bragg 衍射中的相位失配问题^[11], 但其结果不适用于隔离器.

我们曾设计过一种自相位补偿磁光隔离器^[12], 其非互易与互易模转换器都工作在相位失配条件下, 因此波导设计比 Wolfe, Holmes 等的方案容易些, 同时还不需要相位补偿器, 简化了隔离器结构. 与 Dammann 等的方案相比, 减小了插入损耗, 并且两个偏振器与波导方向一致, 可以在集成波导器件中实现.

本文从理论上阐述了自相位补偿原理, 解决了模变换型磁光隔离器中的相位失配问题. 文中利用微扰理论分析了 TE, TM 模在非互易与互易模转换器中振幅和相位的变化规律, 揭示了相位失配对模转换率的影响, 讨论了利用相位失配来调整两模转换器的相位关系以达到互易与非互易转换器连接时对相位的要求. 最后还用有限差分光束传输法 (FDBPM) 进行了数值仿真, 对自相位补偿理论

* 国家自然科学基金 (批准号:60588502) 资助的课题.

† E-mail: zengweiyu@yahoo.com.cn

进行了验证.

2 模耦合理论

在磁光波导中, 电场矢量 \mathbf{E} 所满足的波动方程为

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \nabla (\nabla \cdot \mathbf{E}) + k_0^2 [\varepsilon] \mathbf{E} = 0, \quad (1)$$

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, 介电系数为张量形式

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_r & \varepsilon_{xy} & 0 \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_r & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_r \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 $\varepsilon_{xy} = -\varepsilon_{yx} = -j\delta$, $\delta = n\lambda\theta_F/\pi$, θ_F 为磁光介质的比法拉第旋转角, n 为介质折射率.

设波导沿 z 轴分布均匀, 即满足 $\partial\varepsilon_r/\partial z = 0$, 从 (1) 式解出 x, y 分量为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\varepsilon_r} \frac{\partial (\varepsilon_r E_x)}{\partial x} \right] + \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} \\ & + \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} + \varepsilon_r k_0^2 E_x + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\varepsilon_r} \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial y} E_y \right) \\ & - j\delta k_0^2 E_y = 0, \end{aligned} \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{1}{\varepsilon_r} \frac{\partial (\varepsilon_r E_y)}{\partial y} \right] + \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} + \varepsilon_r k_0^2 E_y \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\varepsilon_r} \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial x} E_x \right) + j\delta k_0^2 E_x = 0, \end{aligned} \quad (3b)$$

(3) 式表明 x, y 分量在传输时会相互耦合, 其一是由波导的几何效应引起的, 原因在于介电系数 ε_r 在介质交界处有突变; 其二是由磁光效应引起的. 波导几何效应引起的耦合与光的传输方向相关, 是互易的; 而磁光效应只与磁化方向相关, 与光的传输方向无关, 因此引起的耦合是非互易的. 利用这两种耦合效应可设计出互易与非互易模转换器. 由于这些耦合通常都较小, 将其作为微扰处理, 因此准 TE 模和准 TM 模的模场可以表示为

$$E_y = A_y(z) \phi_y(x, y) \exp(-j\beta z), \quad (4a)$$

$$E_x = A_x(z) \phi_x(x, y) \exp(-j\beta z), \quad (4b)$$

其中 $\phi_{x,y}$ 为准 TE 模及准 TM 模的模场分布, $\beta = (\beta_{\text{TE}} + \beta_{\text{TM}})/2$, β_{TE} , β_{TM} 分别为准 TE 模和准 TM 模的传输常数.

根据 (3) 和 (4) 式推导出振幅 $A_{x,y}$ 满足的耦合方程为

$$\partial A_x / \partial z = \kappa_{xy} A_y - j\Delta A_x, \quad (5a)$$

$$\partial A_y / \partial z = \kappa_{yx} A_x + j\Delta A_y, \quad (5b)$$

式中 $\Delta = (\beta_{\text{TM}} - \beta_{\text{TE}})/2$, 为两模式的相位失配量. κ_{xy} 和 κ_{yx} 为耦合系数:

$$\begin{aligned} \kappa_{xy} = & \frac{1}{2\beta \iint |\phi_x|^2 dx dy} \\ & \times \left[-j \iint \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\varepsilon_r} \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial y} \right) \phi_x^* \phi_y dx dy \right. \\ & \left. - k_0^2 \delta \iint \phi_x^* \phi_y dx dy \right], \end{aligned} \quad (6a)$$

$$\begin{aligned} \kappa_{yx} = & \frac{1}{2\beta \iint |\phi_y|^2 dx dy} \\ & \times \left[-j \iint \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\varepsilon_r} \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial x} \right) \phi_x \phi_y^* dx dy \right. \\ & \left. + k_0^2 \delta \iint \phi_x \phi_y^* dx dy \right]. \end{aligned} \quad (6b)$$

两个耦合系数满足关系 $\kappa_{xy} = -\kappa_{yx}^* = \kappa$, 耦合系数的大小与介电系数在 x 轴方向的分布、磁光系数及模场的分布相关. 假设在 $z = 0$ 处只有一个模式, 即 $A_x(0) = A_0$, $A_y(0) = 0$, 则在 $z > 0$ 处, 根据 (5) 式求出振幅为

$$\begin{aligned} A_x = & A_0 \left[\frac{-j\Delta}{\sqrt{\Delta^2 + |\kappa|^2}} \sin \left(\sqrt{\Delta^2 + |\kappa|^2} z \right) \right. \\ & \left. + \cos \left(\sqrt{\Delta^2 + |\kappa|^2} z \right) \right], \end{aligned} \quad (7a)$$

$$A_y = A_0 \frac{-\kappa^*}{\sqrt{\Delta^2 + |\kappa|^2}} \sin \left(\sqrt{\Delta^2 + |\kappa|^2} z \right), \quad (7b)$$

由于准 TE 模的功率与 $|A_y|^2$ 成正比, 准 TM 模的功率与 $|A_x|^2$ 成正比, (7) 式表明耦合使每一模式的功率周期性变化, 最大转换率为 $|\kappa|^2 A_0^2 / (\Delta^2 + |\kappa|^2)$, 当 $\Delta \neq 0$ 时转换率小于 1. 模转换型隔离器是由一个 45° 的非互易与一个 45° 的互易模转换器构成, 即在每个模转换器中的转换率均为 50%, 这就要求 $|\kappa| \geq |\Delta|$.

3 45° 互易与非互易模转换器中的振幅与相位

波导的几何效应会引起模式间的耦合, 但在

对称结构中, 这种耦合十分小, 不能实现模式的转换^[13]. 因此利用波导的几何效应设计的互易模转换器都是非对称的, 耦合系数为

$$\kappa_a = \frac{-j}{2\beta \iint |\phi_x|^2 dx dy} \times \iint \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\varepsilon_r} \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial y} \right) \phi_x^* \phi_y dx dy, \quad (8)$$

这是一个纯虚数, 符号与波导的形状有关. 仍假设初始输入只有一个模式, 则在转换率为 50% 时两模式的振幅为

$$A_x = \frac{\sqrt{|\kappa_a|^2 - \Delta_a^2} - j\Delta_a}{|\kappa_a|} \frac{A_0}{\sqrt{2}} = \frac{A_0}{\sqrt{2}} \exp(j\theta_{xa}), \quad (9a)$$

$$A_y = -\frac{\kappa_a^*}{|\kappa_a|} \frac{A_0}{\sqrt{2}} = \frac{A_0}{\sqrt{2}} \exp(j\theta_{ya}), \quad (9b)$$

由于 κ_a 是纯虚数, 因此 θ_{ya} 等于 $\pi/2$ 或 $-\pi/2$, 而 θ_{xa} 与 Δ_a 及 κ_a 相关, 调整波导结构参数可以改变 θ_{xa} .

非互易模转换器的波导结构通常都是对称的, 模式间的耦合由磁光效应引起, 耦合系数为

$$\kappa_b = -\frac{k_0^2 \delta}{2\beta \iint |\phi_x|^2 dx dy} \iint \phi_x^* \phi_y dx dy. \quad (10)$$

如果初始输入只有一个模式, 则在转换率为 50% 时两模式的相位为

$$\exp(j\theta_{xb}) = \left(\sqrt{|\kappa_b|^2 - \Delta_b^2} - j\Delta_b \right) / |\kappa_b|, \quad (11a)$$

$$\exp(j\theta_{yb}) = -\kappa_b / |\kappa_b|, \quad (11b)$$

由于 κ_b 是纯实数, 因此 θ_{yb} 等于 0 或 $\pm\pi$, θ_{xb} 与 Δ_b 及 κ_b 相关, 调整波导的结构, 选用不同磁光系数的材料及改变磁化方向都会改变其值.

4 光隔离器中的模式转换原理

光隔离器的主体由转换率为 50% 的互易与非互易模转换器构成, 假设光从互易端输入, 从非互易端输出, 在 $z=0$ 时, 设 $A_x(0) = A_0$, $A_y(0) = 0$.

当光从互易模转换器输出时, TE, TM 模转换率为 50%, 两模式的振幅为 (9) 式, 此时光将进入非互易模转换器, 光在非互易模转换器传输时仍满足 (5) 式所示的耦合方程, 但其初值为 (9) 式, 解该

初值的微分方程, 利用 (11) 式, 求出非互易模转换器输出端的振幅为

$$A_x = 0.5A_0 \left[\exp(j\theta_{xa} + j\theta_{xb}) - \exp(j\theta_{ya} + j\theta_{yb}) \right], \quad (12a)$$

$$A_y = 0.5A_0 \left[\exp(j\theta_{xa} + j\theta_{yb}) + \exp(j\theta_{ya} - j\theta_{xb}) \right], \quad (12b)$$

(12) 式表明光隔离器的输出与两模转换器在转换率为 50% 处的相位相关, 下面对 (12) 式进行具体的讨论, 令 $\theta_a = \theta_{xa} - \theta_{ya}$, $\theta_b = \theta_{xb} - \theta_{yb}$.

(i) 若 $\theta_a + \theta_b = n\pi$, ($n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$), 则由 (12) 式可得

$$A_x = \begin{cases} 0 & n \text{ 为偶数,} \\ A_0 \exp[j(\theta_{xa} + \theta_{xb})] & n \text{ 为奇数,} \end{cases} \quad (13a)$$

$$A_y = \begin{cases} A_0 \exp[j(\theta_{ya} - \theta_{xb})] & n \text{ 为偶数,} \\ 0 & n \text{ 为奇数.} \end{cases} \quad (13b)$$

(13) 式说明当两个模转换器的相位差的和为 $n\pi$ 时, 隔离器输出只有一个模式. 如果正向输入为 $(A_x, 0)$, $\theta_a + \theta_b$ 为 π 的奇数倍, 则输出为 $(A_x, 0)$. 当光反向传输时, 非互易模转换器的相位 θ_{yb} 将突变 π , 而互易模转换器的相位不变, 因此 $\theta_a + \theta_b$ 变为 π 的偶数倍, 输出为 $(0, A_y)$, 这样反向光就可以被消除.

由于 θ_{ya} 等于 $\pi/2$ 或 $-\pi/2$, θ_{yb} 等于 0 或 $\pm\pi$, 因此在条件 (i) 中, 传输常数差 $\Delta \neq 0$, 光隔离器工作在相位失配条件下. 由于正向输入输出的两模式相同, 反向输入输出的两模式正交, 因此偏振器方向一致, 这比 Dammann 等的方案实用.

(ii) 若 $\theta_a + \theta_b = (2n+1)\pi/2$, ($n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$), 则由 (12) 式可得

$$A_x = \frac{A_0}{\sqrt{2}} \exp \left[j \left(\theta_{xa} + \theta_{xb} \pm \frac{\pi}{4} \right) \right], \quad (14a)$$

$$A_y = \frac{A_0}{\sqrt{2}} \exp \left[j \left(\theta_{ya} - \theta_{xb} \pm \frac{\pi}{4} \right) \right], \quad (14b)$$

(14) 式说明光在第二个模转换器中相位变化而振幅不变, 即两个模式不相互转换. 从前面的分析可知此时 $\Delta = 0$, Wolfe, Holmes 等利用相位匹配设计出的波导就属于这种情况, 由于此时互易与非互易模转换器间存在 $\pi/2$ 的相位突变, 因此需要在两模转换器中间加一个 $\pi/2$ 的相位补偿器, 显然这会增加器件的长度和制造难度.

如果隔离器工作在条件 (i) 中的相位失配状态下, 光在互易与非互易模转换器中传输时自身会产

生 $\pi/2$ 的补偿相位, 模转换器也起到了相位补偿器的作用. 相位失配在 Wolfe, Holmes 等的设计中是一个不利因素, 需要消除, 但从本文的分析中可以看出, 合理利用相位失配不但可以降低波导的设计难度, 而且也可以简化器件的结构, 减小器件的长度.

(iii) 若 $\theta_a + \theta_b = \Delta\theta$, 则由 (12) 式可得

$$A_x = 0.5A_0 (1 - \cos \Delta\theta + j \sin \Delta\theta) \times \exp [j (\theta_{xa} + \theta_{xb})], \quad (15a)$$

$$A_y = 0.5A_0 (1 + \cos \Delta\theta + j \sin \Delta\theta) \times \exp [j (\theta_{ya} - \theta_{yb})]. \quad (15b)$$

因此输出端准 TE 模和准 TM 模的功率分配比例为

$$\eta_{TM} = \sin^2 (\Delta\theta/2), \quad (16a)$$

$$\eta_{TE} = \cos^2 (\Delta\theta/2). \quad (16b)$$

5 数值仿真

根据耦合方程 (3) 式, 用 FDBPM 对模转换器进行仿真. 假设器件由埋入型波导构成, 如图 1 所示, 波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, 介质折射率 $n_1 = 2.21$, $n_2 = 1.93$, 非互易模转换器的磁化方向沿 z 轴方向, 磁光系数为 δ , 互易模转换器磁光系数为 0.

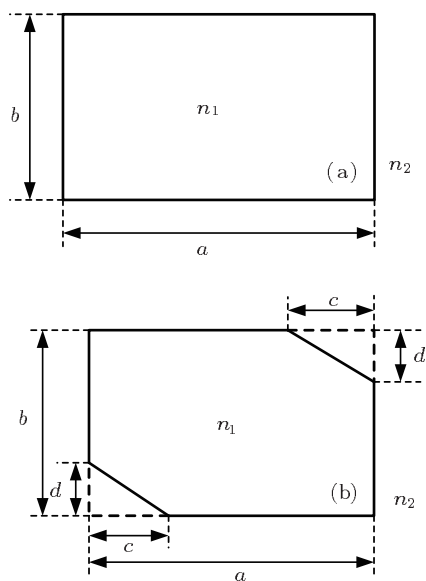


图 1 模转换器截面图 (a) 非互易模转换器; (b) 互易模转换器

为了研究互易与非互易模转换器组合在一起时振幅相位关系对模转换率的影响, 设计了四种不

同结构的互易模转换器与非互易模转换器, 通过仿真, 计算出了转换率为 50% 时的传输距离 L 及相位差 θ_a 和 θ_b , 如表 1 和表 2 所示.

表 1 非互易模转换器

序号	$a/\mu\text{m}$	$b/\mu\text{m}$	δ	$L/\mu\text{m}$	$\theta_b/(\circ)$
NR1	0.72	0.66	-0.0085	159	-36
NR2	0.72	0.66	0.0085	159	144
NR3	0.66	0.72	-0.0085	159	36
NR4	0.66	0.72	-0.0055	280	65

表 2 互易模转换器

序号	$a/\mu\text{m}$	$b/\mu\text{m}$	$c/\mu\text{m}$	$d/\mu\text{m}$	$L/\mu\text{m}$	$\theta_a/(\circ)$
R1	0.72	0.66	0.15	0.12	212	-140
R2	0.72	0.66	0.18	0.15	143	-123
R3	0.72	0.66	0.21	0.21	100	-113
R4	0.66	0.66	0.21	0.21	94	-92

图 2 为非互易模转换器 NR1 的振幅和相位随传输距离变化的仿真结果, 图 3 为互易模转换器 R1 的振幅和相位随传输距离变化的仿真结果. 仿真得出非互易模转换器的最大转换率为 75%, 互易模转

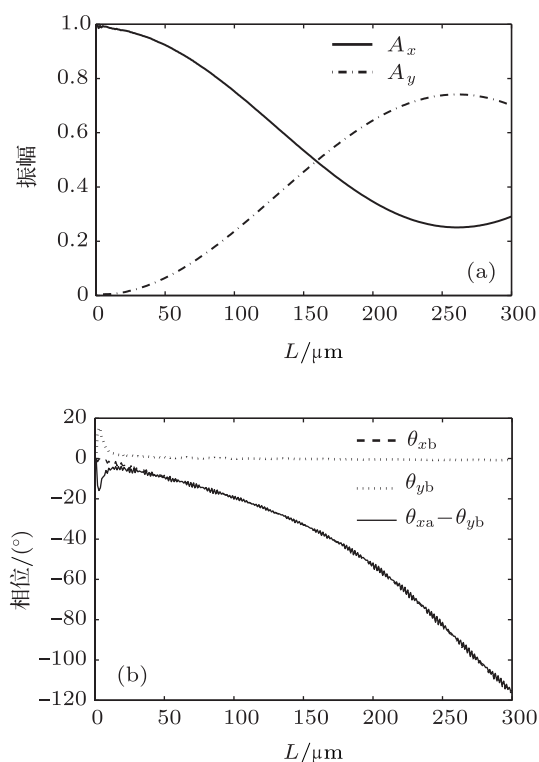


图 2 非互易模转换器 NR1 振幅和相位与传输距离的关系 (a) 振幅; (b) 相位

换器的最大转换率为 62%。这说明在两个模转换器中准 TE 模与准 TM 模的传输常数不同, 处于相位失配状态。另外, 电场 E_x 的相位随传输距离变化, E_y 的相位不变, 与理论分析得出的结论一致。如果初始输入有两个模式, 光在传输时由于磁光效应或非对称波导产生的耦合作用也会形成稳定的相位关系。

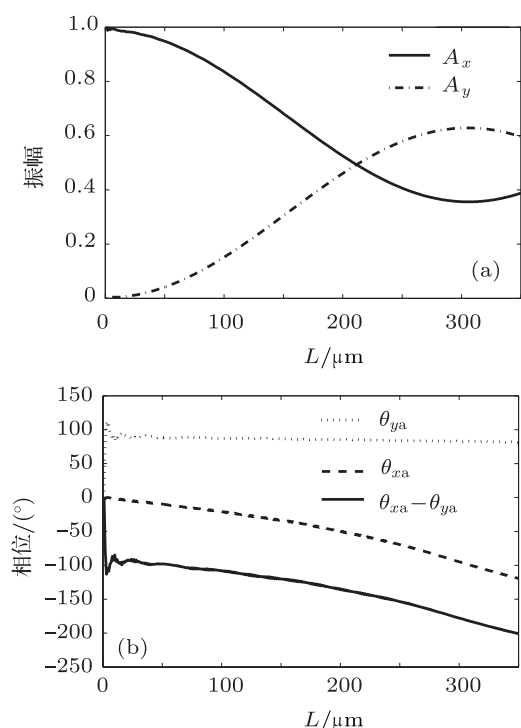


图 3 互易模转换器 R1 振幅和相位与传输距离的关系 (a) 振幅; (b) 相位

将表 1, 表 2 的互易与非互易模转换器组合在一起, 得到 16 种不同结构的组合体, 对这 16 种组合体进行数值仿真, 得到如图 4 所示的结果。图 4 也给出了按 (16) 式计算的理论结果。图 4 表明, 理论计算与数值仿真符合得很好。

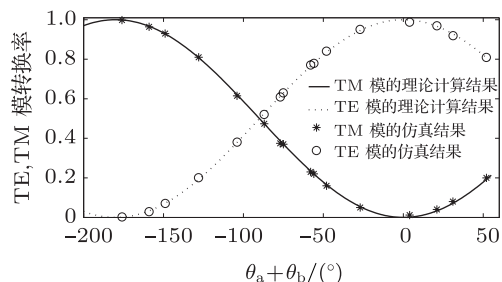


图 4 模转换率与相位 $\theta_a + \theta_b$ 的关系

根据前面的讨论, 为了得到最大的转换率, $\theta_a + \theta_b$ 应等于 $n\pi$, 样品 R1 与 NR1, NR2 的组合基本符合这种条件 (-176° 和 4°), 如果 R1+NR1 为光的正向传输方式, NR2+R1 则为光的反向传输方式, 这两种组合结构的模式转换及相位变化结果如图 5 所示。图 5 的仿真结果得出正向输入为 TM 模时输出为 TM 模, 反向输入为 TM 模时输出为 TE 模, 如

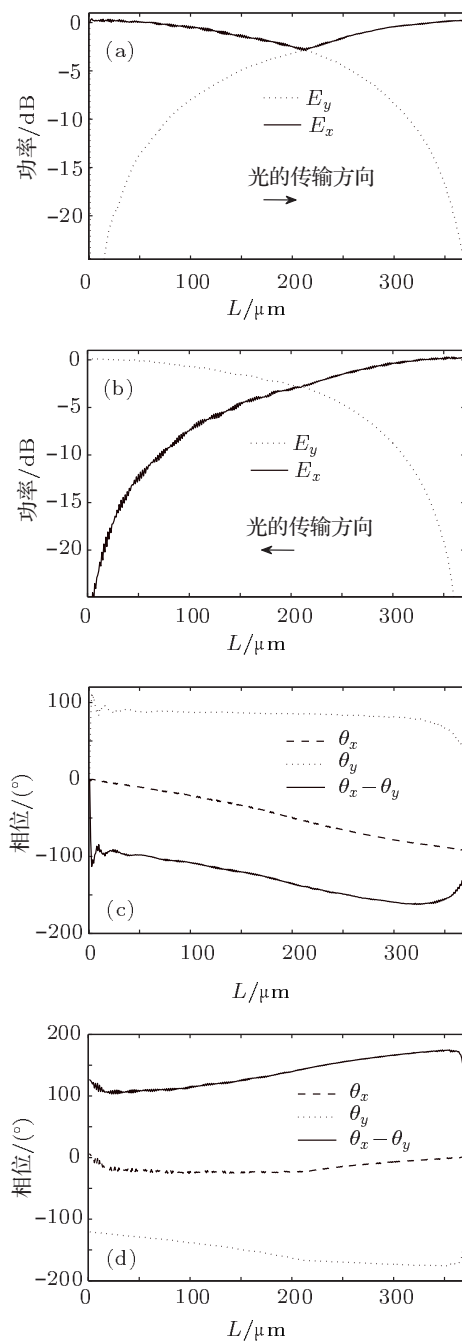


图 5 不同传输方向的仿真结果 (a) 光正向传输时的功率; (b) 光反向传输时的功率; (c) 光正向传输时的相位; (d) 光反向传输时的相位

果在两端加入偏振器,则可构成光隔离器.由于正向输出与反向输出的两模式正交,因此偏振器方向一致,与 Dammann 等提出的偏振器成 45° 放置不同.同时从图 2 和图 3 中可以看出,在两个单独的模转换器中,TE, TM 模的转换率均小于 100%,但将两者组合在一起时转换率却达到了 99.3%,说明在相位失配条件下也可以构成隔离器.从图 4 可以看出,组合结构的转换率只与相位关系 $\theta_a + \theta_b$ 相关,改善这种相位关系可以提高模式的转换率.

6 结论

在模转换型光隔离器中,模式的转换率由互易与非互易模转换器在转换率为 50% 处的相位关系决定,利用 TE, TM 模之间的相位失配可以补偿互易与非互易模转换器连接时的 $\pi/2$ 相位突变,可设计出工作在相位失配条件下的隔离器,数值仿真结果与理论推导相符.本文的理论结果对研究模转换型光隔离器有一定的参考价值.

- [1] Ando K, Okoshi T, Koshizuka N 1988 *Appl. Phys. Lett.* **53** 4
- [2] Fujita J, Levy M, Osgood R M, Wilkens Jr L, Dotsch H 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 2158
- [3] 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
- [4] Wen X W, Li G J, Qiu G X, Li Y P, Ding L, Sui Z 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3571 (in Chinese) [温晓文, 李国俊, 仇高新, 李永平, 丁磊, 隋展 2004 物理学报 **53** 3571]
- [5] Wen X W, Li G J, Qiu G X, Li Y P, Ding L, Sui Z 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1847 (in Chinese) [温晓文, 李国俊, 仇高新, 李永平, 丁磊, 隋展 2005 物理学报 **54** 1847]
- [6] Li G J, Kang X L, Li Y P, Lü C, Fan Z X, Ding L, Sui Z 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2945 (in Chinese) [李国俊, 康学亮, 李永平, 吕超, 范正修, 丁磊, 隋展 2007 物理学报 **56** 2945]
- [7] Wolfe R, Dillon J F, Liebermann Jr R A, Fratello V J 1990 *Appl. Phys. Lett.* **57** 960
- [8] Holmes B M, Hutchings D C 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 061116
- [9] Xie K, Boardman A D, Xie M, Yang Y J, Jiang H M, Yang H J, Wen G J, Li J, Chen K, Chen F S 2008 *Opt. Commun.* **281** 3275
- [10] Dammann H, Pross E, Rabe G, Tolksdorf W 1990 *Appl. Phys. Lett.* **56** 1302
- [11] Wu B J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3095 (in Chinese) [武保剑 2006 物理学报 **55** 3095]
- [12] Zeng W Y, Xie K, Jiang H M, Chen K 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3607 (in Chinese) [曾维友, 谢康, 姜海明, 陈凯 2008 物理学报 **57** 3607]
- [13] Huang W P, Xu C L 1993 *IEEE J. Quantum Electron.* **29** 2639

Operation principle of optical waveguide isolator based on TE-TM mode conversion*

Zeng Wei-You^{1)†} Xie Kang²⁾ Chen Wei¹⁾ Mao Shu-Zhe¹⁾

1) (*School of Science, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, China*)

2) (*School of Instrument Science and Opto-Electronic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China*)

(Received 20 October 2011; revised manuscript received 16 December 2011)

Abstract

According to the perturbation theory, the theory of self-phase compensation is developed for the optical waveguide isolator based on the TE-TM mode conversion. The operation principle of such a device is explained in terms of synchronization of phase and power conversion. The effect of balancing phase mismatches of the two converters on achieving a proper percentage of mode conversion is revealed. The simulation results confirm the self-phase compensation theory.

Keywords: magneto-optical isolator, nonreciprocal wave propagation, phase matching

PACS: 42.82.-m

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60588502).

† E-mail: zengweiyu@yahoo.com.cn