

# 光折变长周期波导光栅耦合器的设计和分析

张 明 任建文 陈 文 乐孜纯

浙江工业大学理学院, 浙江 杭州 310023

**摘要** 为了实现在一种稳定的材料上制作简单的光栅耦合器,提出了在钛扩散铌酸锂波导上制作光折变长周期光栅耦合器的方案。利用有效折射率法和耦合模理论,确定了耦合器的结构参数,包括光栅周期为  $74.28\ \mu\text{m}$ ,两波导的分开距离为  $8\ \mu\text{m}$  以及100%耦合情况下光栅的最小长度为  $2.42\ \text{cm}$ 。分析了传输光谱,得到3 dB带宽为  $5.20\ \text{nm}$ 。模拟结果表明,当光栅长度和偏移距离的容差分别为  $0.37\ \text{cm}$  和  $0.21\ \text{cm}$  时,耦合效率可以达到90%以上。该耦合器有望应用于粗波分复用系统。

**关键词** 集成光学;长周期波导光栅耦合器;耦合模理论;光折变光栅;铌酸锂

中图分类号 TN256

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0313002

## Design and Analysis of Photorefractive Long-Period Waveguide Grating Coupler

Zhang Ming Ren Jianwen Chen Wen Le Zichun

College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China

**Abstract** To obtain an easily made grating coupler with stable materials, a proposal to fabricate photorefractive long-period gratings coupler on Ti-diffused  $\text{LiNbO}_3$  waveguide is presented. Structural parameters of the coupler can be determined by using effective index method and coupled-mode theory, including grating period as  $74.28\ \mu\text{m}$ , separation distance of two waveguides as  $8\ \mu\text{m}$  and the minimum grating length for 100% coupling as  $2.42\ \text{cm}$ . The transmission spectrum is analysed and the 3-dB bandwidth can reach  $5.20\ \text{nm}$ . The simulation results also show that coupling efficiency is above 90% when tolerance of grating length and offset distance is  $0.37\ \text{cm}$  and  $0.21\ \text{cm}$ , respectively. The coupler is expected to be used in coarse wavelength division multiplexing system.

**Key words** integrated optics; long-period waveguide grating coupler; coupled-mode theory; photorefractive grating; lithium niobate

**OCIS codes** 130.3120; 060.1810; 190.5330

## 1 引 言

长周期光栅(LPG)耦合器在光通信领域中有着非常重要的应用<sup>[1-3]</sup>。根据所用材料的不同,LPG耦合器可以被分为长周期光纤光栅(LPFG)耦合器<sup>[1-3]</sup>和长周期波导光栅(LPWG)耦合器<sup>[4-5]</sup>。大多数已经实现的光纤耦合器都是利用紫外(UV)光技术来获得光栅<sup>[1-2]</sup>。此外,还有其他的技术也被用来制作LPFG耦合器,如利用 $\text{CO}_2$ 激光器写入长周期光纤光栅<sup>[3,6]</sup>。

然而,对于LPFG来说,其基底材料只能是现有的几种光纤,而光纤的结构和材料又只有固定的几种类型,不能灵活选择。与之相比,波导材料的种类丰富且结构多样,因此波导耦合器的设计更具灵活性,更易实现高集成度。2005年,Bai和Chiang理论研究了由两个相同且平行的LPWG构成的耦合器,并设计了基于

收稿日期: 2014-09-01;收到修改稿日期: 2014-11-11

基金项目: 国家自然科学基金(61007031)

作者简介: 张 明(1975—),男,博士,副教授,主要从事光通信器件方面的研究。E-mail: cim2046@zjut.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 [www.opticsjournal.net](http://www.opticsjournal.net)

硅聚合物薄膜的耦合器件<sup>[4]</sup>。2009年,Zhang等<sup>[5]</sup>设计了基于聚合物材料的电光(EO)可调谐LPWG耦合器。同年,Chow等<sup>[7-8]</sup>在实验上实现了基于聚合物波导的耦合器。以上光栅的制作都是基于光刻、离子刻蚀、或者紫外光照射的方法。然而,聚合物材料对环境敏感、稳定性较低、耐化学腐蚀能力弱,这些缺点使其应用受到了限制。另外,上述用于制作LPFG或LPWG耦合器的方法,所需的实验设备非常昂贵,制作过程相当复杂且所需时间较长。

因此,有必要找到一个简单可靠、成本低的方法来制作LPWG耦合器,且使用的材料要有很好的稳定性。铌酸锂(LiNbO<sub>3</sub>)晶体正好可以满足上述要求,它不仅是一种在集成光学中广泛应用的良好基底材料,同时也是一种性能良好的光折变晶体<sup>[9]</sup>。光折变效应可被用来制作布拉格光栅滤波器<sup>[10]</sup>和LPWG滤波器<sup>[11]</sup>。然而,基于铌酸锂波导的LPWG耦合器还没有被报道过。

为了在一种稳定的材料上利用简单的方法制作出LPWG耦合器,本文提出了一种新方案,即在钛扩散铌酸锂(Ti:LiNbO<sub>3</sub>)波导上,利用振幅掩模板来制作光折变LPWG耦合器,该耦合器包含两个信道波导,且每个波导上各有一个长周期光栅。利用有效折射率法和耦合模理论,可以求得耦合器的结构参数,以及分析传输光谱。仿真结果显示,耦合器在光栅长度和两光栅的偏移距离上有足够大的容差,而且具有低串扰和高温度稳定性的特点。与文献[11-12]中仅利用单个长周期波导光栅器件实现滤波功能相比,本文设计的双光栅耦合器,通过将谐振波长耦合进输出波导可实现波分复用信号的解复用功能。

## 2 结构和制作方法

图1是振幅法制作LPWG耦合器的结构示意图。可通过二次扩钛的方法来制作波导<sup>[10-12]</sup>;以 $x$ 切或 $y$ 切

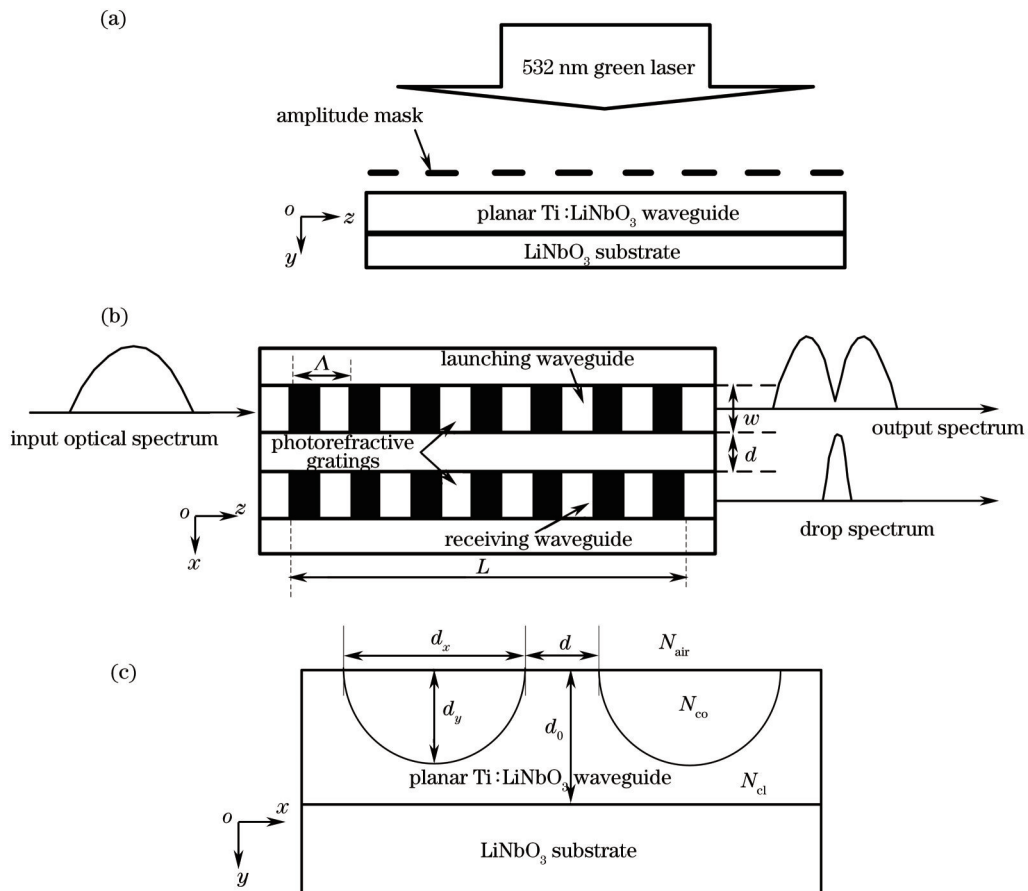


图1 结构与制作示意图。(a)振幅掩模法制作光折变LPWG的结构示意图;(b)光折变LPWG耦合器的工作示意图;(c)波导在 $x$ - $y$ 平面的截面示意图

Fig.1 Schematic diagrams of structure and fabrication. (a) Fabrication of photorefractive LPWG using the amplitude-mask method; (b) photorefractive LPWG coupler working schematic; (c) sectional view of the waveguide in the  $x$ - $y$  plane

的铌酸锂晶体作为基底材料,在铌酸锂晶体的  $x-z$  表面上镀一层钛膜,再利用热扩散法将钛扩散到基底中,形成掺钛的平板波导;再利用光刻(用于形成波导形状)、镀条形钛膜和热扩散法进行第二次扩钛,获得沿  $z$  轴方向的两个平行的、嵌入在平板波导内的单模波导。其中,平板波导作为包层。

如图 1(a)所示,在制得的钛扩散铌酸锂波导上,需利用振幅掩模板来制作光折变 LPWG。所需的振幅掩模板可以用金属铬制成<sup>[7]</sup>,它的周期和光栅周期相同。根据相位匹配条件<sup>[4]</sup>:

$$\lambda_0 = (N_{co} - N_{cl})\Lambda, \quad (1)$$

式中  $N_{co}$  和  $N_{cl}$  分别为波导和包层模式的有效折射率。当响应波长为 1553 nm 时,光栅的周期  $\Lambda$  是 74.28  $\mu\text{m}$  (周期的计算将在后面给出)。

如图 1(a)所示,一束扩束的 532 nm 激光通过振幅掩模板后,垂直照射到两条形波导表面上形成明暗相间的条纹。再通过铌酸锂晶体的光折变效应<sup>[9]</sup>,在两平行的条形波导上形成光折变光栅,如图 1(b)所示。可通过利用 UV 胶与波导两侧端口相粘合的尾纤,来实现光信号在波导内的输入(input)、输出(output)和分下(drop)。光纤到波导的传输损耗不大于 18%<sup>[10]</sup>。

LPWG 耦合器的工作过程如图 1(b)所示。一个宽光谱信号输入到发射波导后,响应波长的光可以被耦合接收(输出)波导;其余波长的光将会直接从输入波导中通过。

### 3 光折变 LPWG 耦合器的设计

#### 3.1 光栅周期和工作模式

图 1(c)是  $x-y$  平面的波导截面图,图中  $d_x, d_y$  分别为  $x, y$  方向上的钛扩散宽度和深度,  $d$  为两平行波导的间距,  $d_0$  为第一次扩钛时的扩散深度,  $N_{air}$  指空气折射率。在 1553 nm 波长条件下,铌酸锂基底的折射率  $n_b = 2.1372$ ,第一次扩钛后,折射率的改变量  $\Delta n_1 = 0.0017$ ,第二次扩钛后,折射率的改变量  $\Delta n_2 = 0.0126$ 。根据文献[11]中的有效折射率法,将平板波导作为波导芯,空气和铌酸锂基底作为包层,得到不同包层模式的有效折射率  $N_{cl}$ 。再将条形波导作为波导芯,空气和平板波导作为包层,计算得到导模的有效折射率  $N_{co}$ 。将计算出的导模和不同包层模式的有效折射率,代入(1)式,可以得到响应波长  $\lambda_0$  和光栅周期  $\Lambda$  的关系,如图 2 所示,图中  $E_{10}, E_{11}, E_{12}, E_{13}$  分别代表不同阶次的电磁场模式。

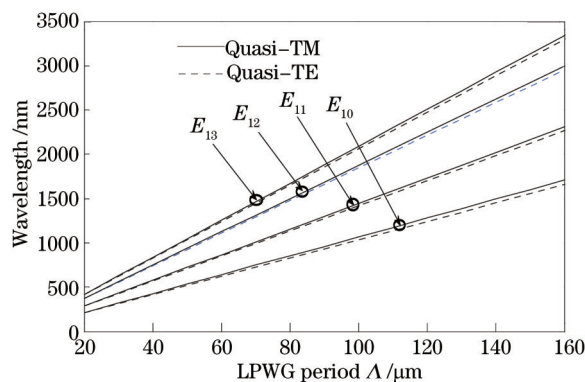


图 2 耦合到不同低阶包层模的相位匹配曲线,所用参数为:  $d_0 = 7.3 \mu\text{m}, d_x = 7.8 \mu\text{m}, d_y = 4.9 \mu\text{m}, d = 8 \mu\text{m}$ ,

$$N_{co} = 2.1515, N_{cl} = 2.1389, N_{air} = 1$$

Fig.2 Phase-matching curves for couplings to different low order cladding modes with  $d_0 = 7.3 \mu\text{m}, d_x = 7.8 \mu\text{m}, d_y = 4.9 \mu\text{m}, d =$

$$8 \mu\text{m}, N_{co} = 2.1515, N_{cl} = 2.1389 \text{ and } N_{air} = 1$$

由图 2 可知,当响应波长在 1550 nm 附近时,  $E_{13}$  的准 TE 模和准 TM 模的曲线几乎重合,这一点有利于设计偏振独立的器件。由于钛扩散引起的折射率增量不是很明显,根据弱导条件,TE 和 TM 模的导模方程几乎相同,因此,在接下来的设计中,取  $TM_{13}$  模作为工作模式。响应波长在 1553 nm 时其导模的有效折射率  $N_{co}$  和  $TM_{13}$  包层模的有效折射率  $N_{cl}$  分别为 2.146229 和 2.125322。此外由图 2 可得,光栅周期  $\Lambda = 74.28 \mu\text{m}$ 。

#### 3.2 两波导的分开距离

如果在 LPWG 耦合器中存在倏逝场的耦合,将会导致传输光谱的非对称性和耦合串扰增加<sup>[4]</sup>。因此有

必要让这种倏逝场耦合尽可能地变小,这可以通过改变两波导的中心距离来实现。根据文献[13],该耦合器可以等效为双矩形定向耦合器,因此倏逝场耦合系数  $C$  可表示为

$$C = \frac{2\Gamma_y \gamma_{1x}^2 \gamma_{2x}^2}{\beta_{TM} k_0^2 (N_{co}^2 - N_{cl}^2) (2 + \gamma_{2x} d_x)} \exp(-\gamma_{2x} d), \quad (2)$$

式中  $\Gamma_y$  是  $y$  方向上 TM 模的功率限制因子,在此设置为 1,  $\gamma_{1x}$ 、 $\gamma_{2x}$  分别为输入波导和接收波导在  $x$  方向上的导模传播常数,并且  $\gamma_{1x}$ 、 $\gamma_{2x}$  满足如下方程:

$$\gamma_{1x} d_x = m\pi + 2 \arctan\left(\frac{\gamma_{2x}}{\gamma_{1x}}\right), \quad m = 0, 1, 2, \dots, \quad (3)$$

$$\gamma_{2x}^2 = k_0^2 N_{co}^2 - k_0^2 N_{cl}^2 - \gamma_{1x}^2, \quad (4)$$

其中,  $\beta_{TM}^2 = k_0^2 N_{co}^2 - \gamma_{1x}^2$  为 TM 模的传播常数,  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  为自由空间波数,  $d_x$  为  $7.8 \mu\text{m}^{[11]}$ ,  $d$  为两平行波导的间距。代入  $N_{co} = 2.146229$  和  $N_{cl} = 2.125322$ , 然后求解(2)~(4)式,可以计算出当两根条形波导之间间距  $d$  大于  $7 \mu\text{m}$  时,倏逝场耦合系数  $C$  趋近于零。在此  $d$  取为  $8 \mu\text{m}$ 。

### 3.3 100%耦合条件下光栅的最小长度

图3是两平行长周期波导光栅耦合器的示意图:光栅的周期为  $\Lambda$ , 长度为  $L$ , 两光栅在  $z$  方向上的偏移距离为  $\Delta L$ 。这里主要研究的是偏移距离  $\Delta L = 0$  的情况,即两波导光栅在  $z$  方向上完全平行对齐的情况。由于光栅很弱<sup>[10]</sup>, 可以看作是波导的一个微扰。因此,可以用一般的耦合模理论分析其模式耦合。

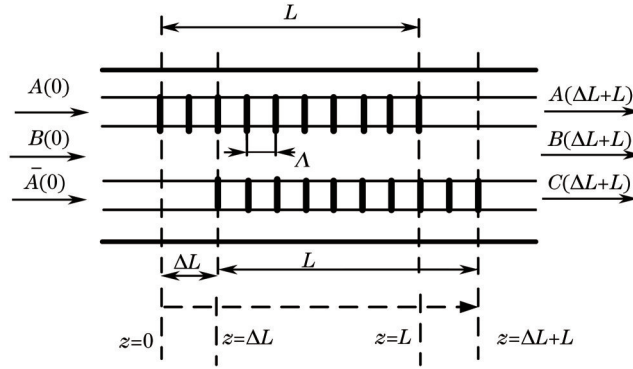


图3 两平行LPWG结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of two parallel LPWGs

当两波导间的倏逝场耦合可以被忽略时,在 LPWG 耦合器中只发生两个耦合过程:一个是输入波导的导模和整个结构的包层模之间发生耦合,另一个是整个结构的包层模和输出波导的导模之间的耦合。

定义输入和输出波导的导模分别为  $A(z)$  和  $\bar{A}(z)$ , 包层模为  $B(z)$ 。根据文献[4],耦合模方程为

$$\frac{dA}{dz} = -j\kappa B \exp(j\delta z), \quad (5)$$

$$\frac{dB}{dz} = -j\kappa A \exp(-j\delta z) - j\kappa \bar{A} \exp(-j\delta z), \quad (6)$$

$$\frac{d\bar{A}}{dz} = -j\kappa B \exp(j\delta z), \quad (7)$$

式中  $\delta = (2\pi/\Lambda)(\lambda_0/\lambda - 1)$  是相位失谐参数,  $\kappa$  是光栅的耦合系数。以上方程的解为

$$A(z) = \frac{1}{2Q} \{ [Q \cos(Qz) - jS \sin(Qz)] \exp(jSz) + Q \} A(0) - j\frac{\kappa}{Q} \sin(Qz) \exp(jSz) B(0) + \frac{1}{2Q} \{ [Q \cos(Qz) - jS \sin(Qz)] \exp(jSz) - Q \} \bar{A}(0), \quad (8)$$

$$B(z) = -j\frac{\kappa}{Q} \sin(Qz) \exp(-jSz) A(0) + \frac{1}{Q} \exp(-jSz) [jS \sin(Qz) + Q \cos(Qz)] B(0) - j\frac{\kappa}{Q} \sin(Qz) \exp(-jSz) \bar{A}(0), \quad (9)$$

$$\bar{A}(z) = \frac{1}{2Q} \{ [Q \cos(Qz) - jS \sin(Qz)] \exp(jSz) - Q \} A(0) - j\frac{\kappa}{Q} \sin(Qz) \exp(jSz) B(0) + \frac{1}{2Q} \{ [Q \cos(Qz) - jS \sin(Qz)] \exp(jSz) + Q \} \bar{A}(0), \quad (10)$$

式中  $S = \delta/2$ ,  $Q = \sqrt{S^2 + 2\kappa^2}$ 。

若输入条件为  $A(0) = 1, B(0) = 0, \bar{A}(0) = 0$ , 则归一化功率为

$$|A(z)|^2 = \frac{1}{4} \left\{ [\cos(Qz) + \cos(Sz)]^2 + \left[ \frac{S}{Q} \sin(Qz) + \sin(Sz) \right]^2 \right\}, \quad (11)$$

$$|B(z)|^2 = \left[ \frac{\kappa}{Q} \sin(Qz) \right]^2, \quad (12)$$

$$|\bar{A}(z)|^2 = \frac{1}{4} \left\{ [\cos(Qz) - \cos(Sz)]^2 + \left[ \frac{S}{Q} \sin(Qz) - \sin(Sz) \right]^2 \right\}. \quad (13)$$

接下来讨论实现 100% 耦合的条件。耦合器的耦合效率  $\eta$  可以定义为输出波导的输出功率与输入波导的输入功率之比:

$$\eta = \frac{|\bar{A}(L)|^2}{|A(0)|^2}. \quad (14)$$

将  $\delta = 0$  和  $|\bar{A}(L)|^2 = |A(0)|^2 = 1$  代入(11)~(13)式可以得到响应波长下实现 100% 耦合条件为

$$\kappa L = \frac{(2n+1)\pi}{\sqrt{2}}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (15)$$

根据光栅的耦合系数<sup>[14]</sup>:

$$\kappa = \frac{k_0(N_{co}^2 - N_{cl}^2)d_y}{2\pi c\mu_0} \int_0^{d_y} \mathbf{E}_0 \cdot \mathbf{E}_m dy, \quad (16)$$

式中  $c$  为光在真空中的传播速度,  $\mu_0$  为真空磁导率,  $\mathbf{E}_0$  和  $\mathbf{E}_m$  分别为条形波导导模和包层模的归一化电场分布矢量,  $d_y = 4.9 \mu\text{m}$  是  $y$  方向上的扩散深度。因此, 可以计算得到耦合系数  $\kappa = 91.79 \text{ m}^{-1}$ 。再根据(15)式, 当  $n$  取 0 时, 可以得到实现 100% 耦合时光栅最小长度  $L_{\min} = 2.42 \text{ cm}$ 。

## 4 光折变 LPWG 的性能分析

### 4.1 传输光谱的模拟与分析

当  $L_{\min} = 2.42 \text{ cm}$ ,  $d = 8 \mu\text{m}$  ( $C=0$ ) 时, 两波导间的传输光谱如图 4(a) 所示, 响应波长 ( $\delta = 0$ ) 的耦合情况如图 4(b) 所示。由图 4(a) 可知, 输入波导的传输光谱表现出带阻的特点, 而输出波导表现出带通的特点。由图 4(b) 可知, 响应波长的光在输入波导、包层、输出波导之间耦合, 最后在 100% 耦合长度时完全耦合到输出波导中。在  $z = 2.42 \text{ cm}$  时, 输入波导的归一化功率降为 0, 输出波导的归一化功率变为 1, 在  $z = 1.21 \text{ cm}$  时, 两波导的归一化功率相等。

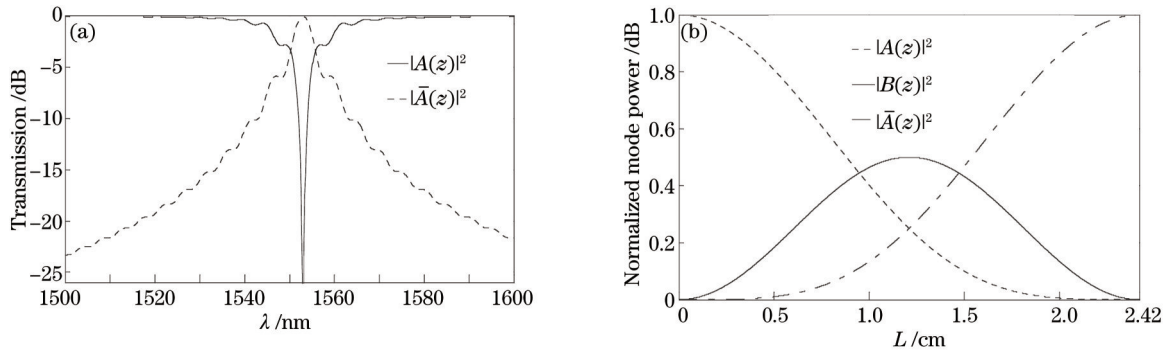


图 4 传输光谱与响应波长。(a) 光栅周期为  $74.28 \mu\text{m}$  且  $n=0$  时, 耦合到  $\text{TM}_{13}$  包层模的传输光谱; (b) 谐振波长条件下 ( $\lambda = \lambda_0$ ), 归一化功率与传播距离的关系

Fig.4 Transmission spectra and response wavelength. (a) Transmission spectrum for coupling to  $\text{TM}_{13}$  cladding mode with the grating pitch of  $74.28 \mu\text{m}$  at  $n=0$ ; (b) relationship between normalized power and propagation distance at response wavelength ( $\lambda = \lambda_0$ )

在该光栅耦合器的设计中,取  $n=0$ ,不仅是因为可以得到最小的光栅长度,同时也是为了获得更好的光谱性能。由图 5(a)可知,当  $n$  等于 1 时,传输光谱出现了很明显的旁瓣效应。由图 5(b)可知,耦合过程循环了不止一次,这会导致 LPWG 耦合器在实际应用中增加功率损耗。

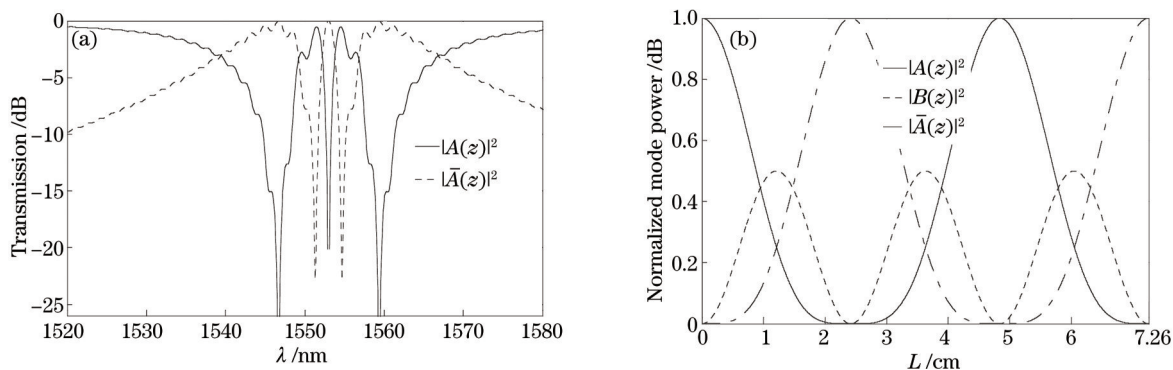


图 5 传输光谱与归一化功率。(a)  $n=1$  时的传输光谱;(b)  $\delta=0$  时,LPWG 耦合器归一化功率与传播距离的关 ( $\lambda=\lambda_0$ ) 当  $\delta=0$

Fig.5 Transmission spectra and normalized power. (a) Transmission spectrum at  $n=1$ ; (b) relationship between normalized power and propagation distance at response wavelength ( $\lambda=\lambda_0$ ) when  $\delta=0$

### 4.2 LPWG 耦合器的 3 dB 带宽

为了求得输出波导中的 3 dB 带宽,将 (15) 式和  $|\bar{A}(L)|^2 = 0.5$  代入 (13) 式,可以得到相位失谐参数  $\delta_{3\text{dB}}$  为

$$\delta_{3\text{dB}} = \pm \frac{3.434}{(2n+1)L}, \quad (17)$$

响应波长可以通过相位失谐参数来获得:

$$\lambda_{3\text{dB}} = \frac{2\pi}{\Lambda} \cdot \lambda_0 / \left( \delta_{3\text{dB}} + \frac{2\pi}{\Lambda} \right), \quad (18)$$

因此,3 dB 带宽满足:

$$\Delta\lambda_{3\text{dB}} = 2(\lambda_0 - \lambda_{3\text{dB}}) = 2\lambda_0 / \left[ 1 + \frac{2\pi}{3.434} \cdot \frac{(2n+1)L}{\Lambda} \right], \quad (19)$$

将参数  $L_{\text{min}}$  和  $\Lambda$  代入 (19) 式,得到 3 dB 带宽为 5.20 nm,可满足粗波分复用系统 (CWDM) 的应用需求。(19) 式成立的条件是:导模和包层模的有效折射率在谐振波长  $\lambda_0$  附近不变。

图 6 是当  $n$  取不同值时,长周期波导光栅耦合器中耦合长度  $L$  和 3 dB 带宽的关系。可以看出,当  $n$  从 0 到 1 变化时,3 dB 带宽急剧下降,同时耦合长度  $L$  增加。结合前面所讨论的光谱特点, $n$  取 0 是最好的选择。

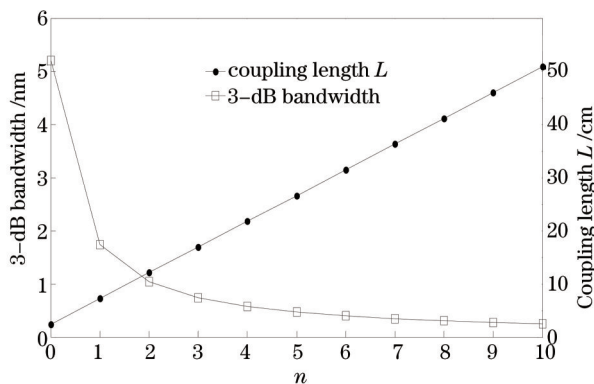


图 6 当  $n$  取不同值时,长周期波导光栅耦合器中耦合长度  $L$  和 3 dB 带宽的关系

Fig.6 Relationship of 3 dB bandwidth and coupling length  $L$  on the different values of  $n$

### 4.3 光栅长度容差的讨论

定义参数的容差等于其引起耦合效率下降到 90% 时该参数的改变量。根据 (14) 式,可以得到光栅长度  $L$  与耦合效率  $\eta$  的关系,如图 7 所示。可得当参数  $L$  的容差为  $2.42 \text{ cm} \pm 0.37 \text{ cm}$  时,输入波导中 90% 以上的功率

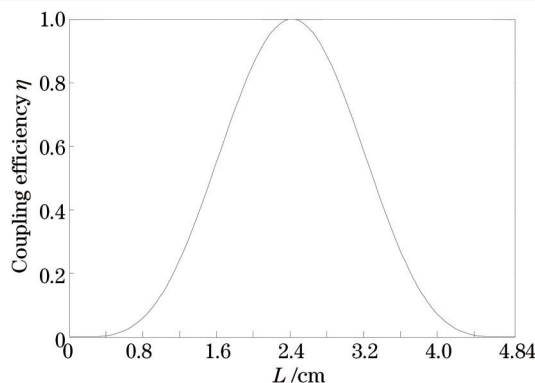


图7 光栅长度与耦合效率 $\eta$ 的关系

Fig.7 Relationship between the grating length  $L$  and the coupling efficiency  $\eta$

将耦合进接收波导。

#### 4.4 两光栅偏移量 $\Delta L$ 对耦合效率 $\eta$ 的影响

由图3的实验示意图可知,在实际制作过程中,在 $z$ 方向上两平行的LPWG可能没有完全对齐,比如具有 $\Delta L$ 的偏移距离。这里,可以用和以上相同的方法来分析参数 $\Delta L$ 的容差问题。由图8可知,当参数 $\Delta L$ 小于0.21 cm(点 $a$ )时,耦合效率是大于90%的,这个条件在实验上可以很容易实现。此外,当 $\Delta L$ 增加到1.38 cm(点 $b$ )时,耦合效率有一个极小值11.87%,当 $\Delta L$ 增加到2.07 cm(点 $c$ )时,耦合效率又出现了一个极大值66.52%。

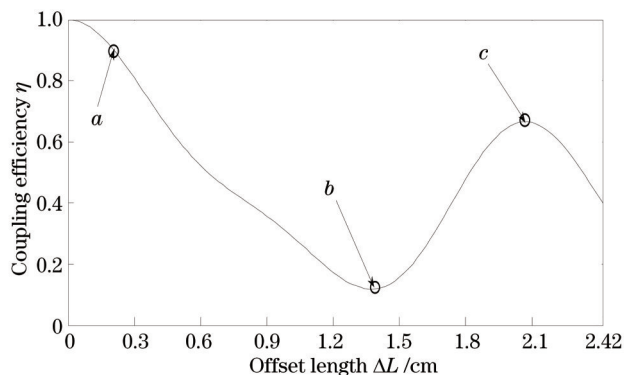


图8 响应波长 $\lambda_0$ 条件下,耦合效率 $\eta$ 与偏移距离 $\Delta L$ 的关系

Fig. 8 Variation of the coupling efficiency  $\eta$  at the resonance wavelength  $\lambda_0$  with the offset distance  $\Delta L$

#### 4.5 串扰和温度对耦合器性能的影响

在耦合过程中,如果有其他波长也被耦合进输出波导,就会对信号光造成串扰。在CWDM系统的应用中,与1553 nm相邻的两个波长分别为1530 nm和1570 nm。在1553 nm波长满足100%耦合的结构条件下,对1530 nm和1570 nm两个波长与 $TM_{13}$ 模式之间的耦合进行分析:根据(16)式,分别求得这两个波长的耦合系数: $\kappa_{1530} = 92.32 \text{ m}^{-1}$ ,  $\kappa_{1570} = 91.40 \text{ m}^{-1}$ ,再进一步可求得两波长的耦合效率: $\eta_{1530} = 2.55\%$ ,  $\eta_{1570} = 4.85\%$ 。结果表明,串扰不足以影响器件的工作性能。

此外,温度的变化也会引起光栅周期的变化,从而影响耦合的中心波长。铌酸锂晶体在沿着光轴 $c$ 方向上的热膨胀系数 $\alpha_{33} = [(4.5 \pm 0.5) \times 10^{-6}] \text{ K}^{-1[10]}$ ,如果耦合器的工作温度范围为290 K~330 K,则 $\Delta\Lambda = \alpha_{33}\Delta T = 13.37 \text{ nm} \pm 1.49 \text{ nm}$ ,相应的中心波长偏移量 $\Delta\lambda = 0.28 \text{ nm} \pm 0.03 \text{ nm}$ 。

#### 4.6 光束传播法(BPM)仿真分析

根据以上理论计算条件及结果,利用光学波导设计软件OptiBPM进行BPM算法仿真。仿真环境如下:仿真矩形结构范围 $x$ 方向 $-20 \sim 20 \mu\text{m}$ , $y$ 方向 $-20 \sim 2 \mu\text{m}$ (其中 $0 \sim 2 \mu\text{m}$ 为空气层), $z$ 方向 $0 \sim 24200 \mu\text{m}$ ,仿真步长 $\Delta x = 0.25 \mu\text{m}$ , $\Delta y = 0.2 \mu\text{m}$ , $\Delta z = 2.5 \mu\text{m}$ ,算法类型为Semi-Vector TM,控制收敛的参数为-2。扩钛条件如下:第一次扩钛时,钛条厚度为20 nm,扩散宽度为 $4 \mu\text{m}$ ,扩散深度为 $7.3 \mu\text{m}$ ,扩钛后折射率为2.1392;第二次扩钛时,钛条厚度80 nm,扩散宽度为 $3.9 \mu\text{m}$ ,扩散深度为 $4.9 \mu\text{m}$ ,扩钛后折射率为2.1439。此外,如前所述,

LiNbO<sub>3</sub>基底折射率为 2.1372,波导沿晶轴方向(z轴)。光栅波导结构的折射率分布模型如图 9(a)所示,输出和输入波导中心分别位于±7.93 μm处。

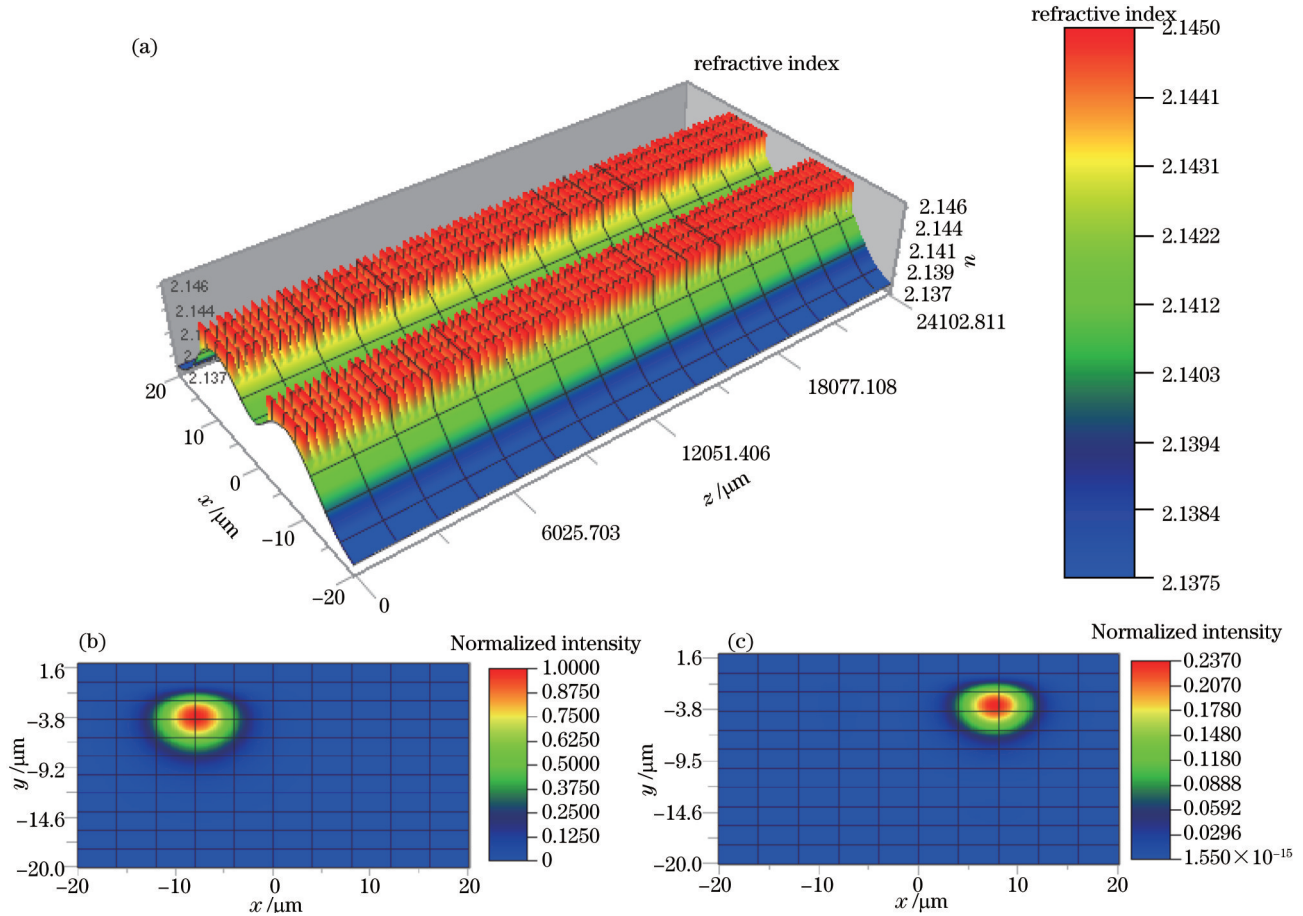


图 9 折射率分布及共振波长在输入输出端面功率分布。(a)  $x-z$  平面折射率分布;(b)输入端面功率分布;(c)输出端面功率分布  
Fig.9 Distribution of refractive index and power distribution of resonance wavelength at end faces. (a) Distribution of refractive index in  $x-z$  plane; (b) input end face; (c) output end face

用 Matlab 将 BPM 软件仿真得到的透射率光谱数据进行归一化,得到输出端面处的透射率光谱和共振波长如图 10 所示,其共振波长为 1553 nm,与理论计算结果相同,而且可见输入波导中的共振波长已经 100%耦合进了包层中。从图 9(b)和(c)的输入、输出端面功率分布也可以看出,输入波导中的共振波长被完全耦合进了包层,进而耦合到了输出波导中。

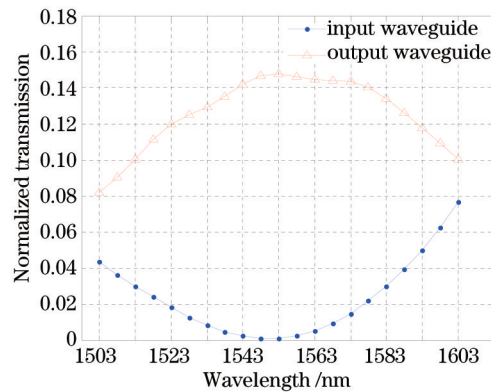


图 10 归一化的透射率光谱和共振波长仿真结果

Fig.10 Normalization for simulated transmission spectra and response wavelength

与理论计算结果相比,一方面由于仿真中的波导并非理论计算时近似采用的矩形波导,因此对光信号



限制不足,从而造成了全光谱信号在包层中的泄露,进而导致信号光带宽增加。另一方面,因为仿真时引入了理论计算时没有考虑的光在包层中的传播损耗,造成了最终耦合进接收波导的效率不够高(约14.8%)。

## 5 结 论

提出了在铌酸锂晶体上利用振幅掩模法制作 LPWG 耦合器的方案。当使用  $TM_{13}$  模式作为实验的包层模式时,光栅的周期  $\Lambda=74.28 \mu\text{m}$ 。响应波长为 1553 nm 时,导模和包层模的有效折射率分别为 2.146229 和 2.125322。两波导的间距为 8  $\mu\text{m}$  时,倏逝场耦合效率变为零,从而得到实现 100% 耦合的最小长度为 2.42 cm。

此外,分析了两波导的传输光谱,计算出耦合器的 3 dB 带宽为 5.20 nm。仿真结果表明,当光栅长度和偏移距离的容差分别小于  $\pm 0.37 \text{ cm}$  和 0.21 cm 时,耦合效率可以达到 90% 以上。同时该器件还具有低串扰和高温度稳定性的特点。

## 参 考 文 献

- 1 V Grubsky, D S Starodubov, J Feinberg. Wavelength-selective coupler and add-drop multiplexer using long-period fiber gratings [C]. *Optical Fiber Communication*, 2000, 4: 28-30.
- 2 M J Kim, Y M Jung, B H Kim, *et al.*. Ultra-wide bandpass filter based on long-period fiber gratings and the evanescent field coupling between two fibers [J]. *Opt Express*, 2007, 15(17): 10855-10862.
- 3 Y Liu, K S Chiang, Y J Rao, *et al.*. Light coupling between two parallel  $\text{CO}_2$  laser written long-period fiber gratings [J]. *Opt Express*, 2007, 15(26): 17645-17651.
- 4 Y Bai, K S Chiang. Analysis and design of long-period waveguide-grating couplers [J]. *J Lightwave Technol*, 2005, 23(12): 4363-4373.
- 5 Q Zhang, Y Liu, J Liao, *et al.*. Design and simulation of a narrow passband electro-optical tunable filter with band-pass and band-rejection output [J]. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2009, 30(9): 959-968.
- 6 Liang Lili, Liu Mingsheng, Li Yan, *et al.*. Method of one-time writing LPFG using high-frequency  $\text{CO}_2$  laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(9): 090503.  
梁丽丽,刘明生,李燕,等.使用高频  $\text{CO}_2$  激光器一次写入长周期光纤光栅的方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(9): 090503.
- 7 C K Chow, K S Chiang, Q Liu, *et al.*. UV-written long-period waveguide grating coupler for broadband add/drop multiplexing [J]. *Opt Commun*, 2009, 282(3): 378-381.
- 8 Y Bai, Q Liu, K P Lor, *et al.*. Widely tunable long-period waveguide grating couplers [J]. *Opt Express*, 2006, 14(26): 12644-12654.
- 9 L Arizmendi. Photonic applications of lithium niobate crystals [J]. *Physica Status Solidi. A: Applied Research*, 2004, 201(2): 253-283.
- 10 J Hukriede, D Runde, D Kip. Fabrication and application of holographic Bragg gratings in lithium niobate channel waveguides [J]. *Journal of Physics. D: Applied Physics*, 2003, 36(3): R1-R16.
- 11 M Zhang, W Chen, L Chen, *et al.*. Photorefractive long-period waveguide grating filter in lithium niobate strip waveguide [J]. *Opt Quant Electron*, 2014, 46(12): 1529-1538.
- 12 P R Hua, D L Zhang, P Edwin, *et al.*. Long period grating on strip  $\text{Ti-LiNbO}_3$  waveguide embedded in planar  $\text{Ti-LiNbO}_3$  waveguide [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2010, 22(18): 1361-1363.
- 13 K Okamoto. *Fundamentals of Optical Waveguides* [M]. New York: Academic Press, 2006. 159-203.
- 14 Q Liu, K S Chiang, V Rastogi. Analysis of corrugated long-period gratings in slab waveguides and their polarization dependence [J]. *J Lightwave Technol*, 2003, 21(12): 3399-3405.

栏目编辑: 王晓琰