

## 基于铌酸锂光子线波长分裂器的研究

陈明, 赵永乐, 牛奔, 宋华

(西安邮电大学 电子工程学院, 陕西 西安 710121)

**摘要:** 在集成光学领域, 光波长分裂器对于光信号重新分配具有重要作用。设计了一种光波长分离器, 这种器件可以把波长为  $1.31\ \mu\text{m}$  和  $1.55\ \mu\text{m}$  光的 TE 模式分裂开。该器件基于两个平行铌酸锂光子线的定向耦合器的工作原理, 并且可以用有限元法设计和仿真。计算稳态场分布表明, 波长为  $1.31\ \mu\text{m}$  与  $1.55\ \mu\text{m}$  的光波在空间上可以分离开。并且,  $1.31\ \mu\text{m}$  波的透射率可以达到 91%,  $1.55\ \mu\text{m}$  波的透射率可以达到 86%。该器件的尺寸只有  $26.2\ \mu\text{m}\times 10.1\ \mu\text{m}$ 。

**关键词:** 集成光学; 铌酸锂光子线; 波长分裂器; 耦合长度

**中图分类号:** O436.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0620003

## Wavelength splitter in LiNbO<sub>3</sub> photonic wire device

Chen Ming, Zhao Yongle, Niu Ben, Song Hua

(School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an 710121, China)

**Abstract:** In the field of integrated optics, optical wavelength splitters is a key element in light signal redistribution. A optical wavelength splitter was presented for  $1.31\ \mu\text{m}$  and  $1.55\ \mu\text{m}$  wavelengths with TE mode. The device was based on the operating principle of a directional coupler in two parallel LiNbO<sub>3</sub> photonic wire, and can be designed and simulated by finite element method. The calculated steady-state field distributions indicate that the wavelengths of  $1.31\ \mu\text{m}$  and  $1.55\ \mu\text{m}$  light waves are spatially separated. In this device, transmittances at the  $1.31$  and  $1.55\ \mu\text{m}$  wavelength are 91% and 86% respectively. The size of this device is only  $26.2\ \mu\text{m}\times 10.1\ \mu\text{m}$ .

**Key words:** integrated optics; LiNbO<sub>3</sub> photonic wire; wavelength splitter; coupling length

收稿日期: 2015-10-05; 修订日期: 2015-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(61040064)

作者简介: 赵永乐(1989-), 男, 硕士生, 主要从事集成光学器件的研究与设计方面的研究。Email: 335946421@qq.com

导师简介: 陈明(1956-), 男, 教授, 博士, 主要从事集成光学、微波光子学等方面的研究。

## 0 引言

集成光学里,最理想的设想就是把从光源到探测器的所有器件都完全集成在同一个衬底上,形成一个紧凑、密实、体积小巧的单片集成光路,在最大程度上发挥集成光学的优势。

铌酸锂材料同时具有特殊的导光、光电效应和压电效应等作用。而它的这些作用适用于研制如光开关、调制器、耦合器和滤波器等功能器件。就目前的集成光路研制水平,铌酸锂是比较适合制造一些器件的。并且铌酸锂光子线在未来的集成光子学中被寄予厚望。具有高折射率的铌酸锂波导平台被称为铌酸锂绝缘<sup>[1]</sup>(Lithium Niobate on Insulator, LNOI)。为了实现铌酸锂光子器件能与传统光子器件共同完成多信号处理功能,已经提出了一些基于铌酸锂光子线(即铌酸锂光波导)元件<sup>[1-9]</sup>。尤其是,近年来,已经提出了超小型铌酸锂光子线定向耦合器<sup>[10]</sup>、波长分离器<sup>[11]</sup>,等。

文中提出了一种新型结构的铌酸锂光子线波长分离器,它是直接耦合的铌酸锂波导,由两根矩形光子线、两根弯曲光子线、二氧化硅缓冲层和铌酸锂衬底组成,可实现对两个不同光波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的波长分离。其工作原理是:光先由直光子线入射端进入,在两根平行光子线之间耦合前行,由于两束光的传播常数不同,所以在光子线中耦合长度也不同,通过路程差将两束光分开。

## 1 设计与分析

所提出的波长分离器如图 1 所示。在图 2 中可以看到矩形光子线的长度为  $L$ ,耦合域长度为  $C$ ,弯曲光子线半径为  $R$ ,光子线的宽度为  $W$ ,两根平行光子线的间距为  $S$ ,铌酸锂基底厚度为 2 mm,二氧化硅缓冲层厚度为 1.3  $\mu\text{m}$ 。其中,光子线宽  $W=0.5 \mu\text{m}$ ,高为 0.73  $\mu\text{m}$ ,这样光子线中就可以进行单模传输<sup>[8]</sup>。可知<sup>[13]</sup>,当工作波长为 1.31  $\mu\text{m}$  时,铌酸锂的寻常与非寻常折射率  $n_o=2.22, n_e=2.15$ ;当工作波长为 1.55  $\mu\text{m}$  时,铌酸锂的寻常与非寻常折射率  $n_o=2.2112, n_e=2.1381$ 。在耦合域长度  $C$  内,激起偶对称模和奇对称模,它们对应的传播常数分别为  $\beta_e$  和  $\beta_o$ ,然后通过沿传播路径上建立的相位差相互干涉。经过一

个耦合长度  $L_c$  的传播之后,能量从一个光子线转移到另一个光子线上,耦合长度定义为<sup>[12]</sup>:

$$L_c = \pi / |\beta_e - \beta_o|$$

使用基于有限元法的电磁仿真软件 COMSOL Multiphysics 进行建模、仿真与优化。

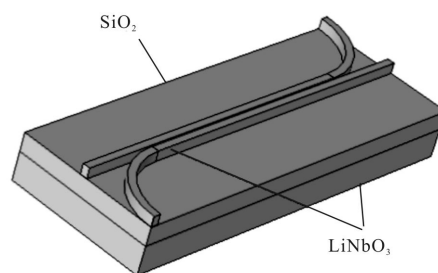


图 1 结构示意图

Fig.1 Structure diagram

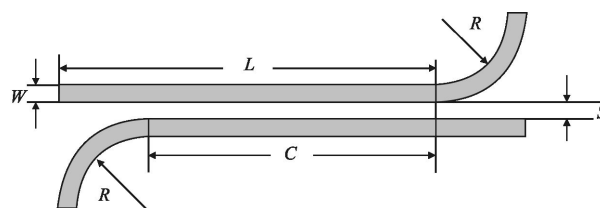


图 2 俯视图

Fig.2 Vertical view

模型建成之后,可以通过改变耦合域长度  $C$ 、光子线间距  $S$  和弯曲光子线半径  $R$  来使波长分离器达到最好工作效果。结果显示,当  $L=21 \mu\text{m}, C=15.8 \mu\text{m}, R=4.5 \mu\text{m}, S=0.1 \mu\text{m}$  时,分离器的工作效果最好。图 3 与图 4 所示为仿真出的电场 TE 模分布图。

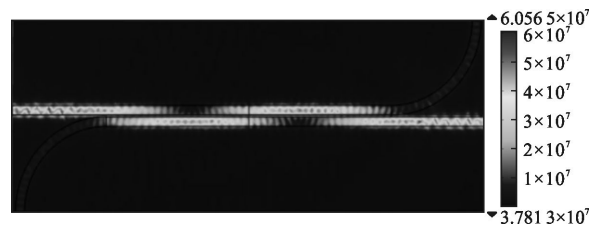


图 3 1.31  $\mu\text{m}$  波 TE 模通过时波导芯层中心截面上的电场模分布  
Fig.3 TE electric field distribution on the waveguide core center of the section at 1.31  $\mu\text{m}$  wavelength

如图 3 所示,由直波导入射端入射的 1.31  $\mu\text{m}$  波长的光波,在平行波导之间耦合,最终再从直波导出射端输出,透射率为 91%。如图 4 所示,同样由直波导入射端入射的 1.55  $\mu\text{m}$  波长的光波,经过平行

波导之间耦合,但由于它的耦合长度与  $1.31\ \mu\text{m}$  光的耦合长度不同,故最终从弯曲波导出射端输出,透射率为 86%。可见,  $1.31\ \mu\text{m}$  波长的光波与  $1.55\ \mu\text{m}$  波长的光波完全分离开,并且都具有较高的透射率。

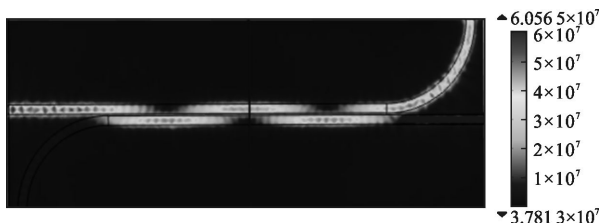


图 4  $1.55\ \mu\text{m}$  波 TE 模通过时波导芯层中心截面上的电场模分布  
Fig.4 TE electric field distribution on the waveguide core center of the section at  $1.55\ \mu\text{m}$  wavelength

图 5 为透射率随波长变化的曲线图,图 5(a)和图 5(b)表示在波长为  $1.55\ \mu\text{m}$  和  $1.31\ \mu\text{m}$  处的透射率最高,分别为 86% 和 91%。并且,  $1.55\ \mu\text{m}$  波透射率超过 85% 的带宽为 18 nm,  $1.31\ \mu\text{m}$  波透射率超过 85% 的带宽为 30 nm。

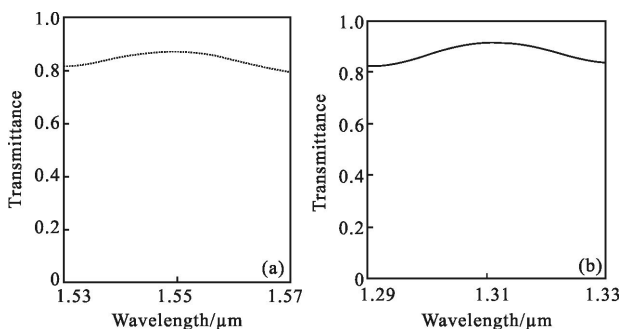


图 5 透射率随波长的变化曲线  
Fig.5 Transmittance vs wavelength

图 6 显示  $1.31\ \mu\text{m}$  与  $1.55\ \mu\text{m}$  波长光的透射率

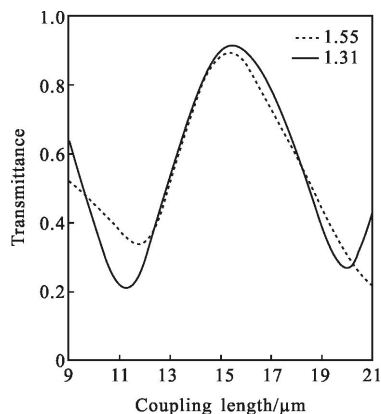


图 6 透射率随耦合域长度的关系图  
Fig.6 Transmittance vs coupling length

在耦合域长度为  $15.8\ \mu\text{m}$  时,透射率最高。图 7 显示透射率随光子线宽度变化的特性曲线,可见当光子线宽度小于  $0.5\ \mu\text{m}$  时,  $1.31\ \mu\text{m}$  波与  $1.55\ \mu\text{m}$  波的透射率都急速下降;大于  $0.5\ \mu\text{m}$  时,透射率均趋于平缓,但在  $0.5\ \mu\text{m}$  处透射率达到最高。其中透射率超过 80% 区间为  $0.49\sim 0.56\ \mu\text{m}$ , 这表明该器件允许一定的误差,这一特性是有实际意义的。

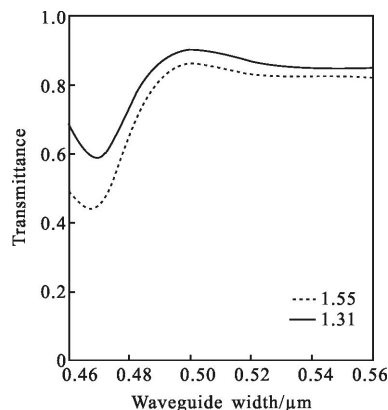


图 7 透射率与波导宽度的关系  
Fig.7 Transmittance vs waveguide width

## 2 结 论

文中用 COMSOL Multiphysics 仿真软件设计了一个超小型波长分裂器。它的透射率较高,其中  $1.31\ \mu\text{m}$  光波达到 91%,  $1.55\ \mu\text{m}$  达到了 86%,且入射端两个端口与出射端两个端口都在不同平面,容易与其他器件连接,具有很高的实用价值。它结构简单,而且对工艺精度也允许一定范围内的误差,对波长的误差范围,  $1.31\ \mu\text{m}$  光波透射率超过 85% 的带宽为 30 nm;  $1.55\ \mu\text{m}$  光波透射率超过 80% 的带宽为 18 nm。对工艺制造误差,光子线的宽度在  $0.49\sim 0.56\ \mu\text{m}$  范围内透射率能达到 80% 以上。这些对该器件制造提供了可靠保障,应用潜力较大。

## 参考文献:

- [1] Rabiei P, Steier W H. Lithium niobate ridge waveguides and modulators fabricated using smart guide [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(16): 161115.
- [2] Djukic D, Cerda-Pons G, Roth R M, et al. Electro-optically tunable second-harmonic-generation gratings in ion-exfoliated thin films of periodically poled lithium niobate [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(17): 171116.

- [3] Guarino A, Poberaj G, Rezzonico D, et al. Electro-optically tunable microring resonators in lithium niobate [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(7): 407–410.
- [4] Schrepel F, Gischkat T, Hartung H, et al. Ultrathin membranes in x-cut lithium niobate [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(9): 1426–1428.
- [5] Takaoka T, Fujimura M, Sahara T. Fabrication of ridge waveguides in LiNbO<sub>3</sub> thin film crystal by proton-exchange accelerated etching [J]. *Electronics Letters*, 2009, 45 (18): 940–941.
- [6] Poberaj G, Koechlin M, Sulser F, et al. Ion-sliced lithium niobate thin films for active photonic devices [J]. *Optical Materials*, 2009, 31(7): 1054–1058.
- [7] Burr G W, Diziain S, P Bernal M. Theoretical study of lithium niobate slab waveguides for integrated optics applications[J]. *Optical Materials*, 2009, 31(10): 1492–1497.
- [8] Hu H, Ricken R, Sohler W. Lithium niobate photonic wires [J]. *Optics Express*, 2009, 17(26): 24261–24268.
- [9] Hu H, Yang J, Gui L, et al. Lithium niobate-on-insulator (LNOI): status and perspectives [C]//SPIE Photonics Europe. International Society for Optics and Photonics, 2012: 84311D.
- [10] Chen M, Liu Z, Lu R, et al. An ultracompact optical directional coupler based on lithium niobate photonic wires [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124(14): 1974–1976.
- [11] Chen Ming, Xing Zhuyan, Wang Zhaohong. Ultracompact wavelength splitters in LiNbO<sub>3</sub> photonic wires [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(2): 027103.
- [12] Yariv A, Yeh P. Photonics: Optical Electronics in Modern Communications [M]. Oxford: Oxford University Press Inc, 2006: 546–554.
- [13] Prokhorov A M, Kuzminov Y S. Physics and chemistry of crystalline lithium niobate[J]. *Chap*, 1990, 5: 161.