

基于 FBG 的电光调制器电极设计

翁思俊, 裴丽, 王建帅, 王一群

(北京交通大学 光波技术研究所, 北京 100044)

摘要: 电光调制器作为光通信系统中最重要的器件之一, 其性能决定了光通信系统的传输性能, 而电光调制器的电极结构、种类和设计都对调制器的性能有重要的影响。针对基于光纤布拉格光栅 (FBG) 的新型电光调制器电极展开了研究和设计, 并通过数值计算方法, 对模场重叠因子、电极结构参数以及模场重叠因子和 FBG 中心波长漂移量的关系做了讨论, 并由此对基于 FBG 的聚合物电光调制器的电极做了一系列的分析和研究。文中的研究对基于 FBG 的电光调制器的制作具有一定的指导意义, 能够促进电光调制器的发展。

关键词: 电光调制器; 电极结构; 中心波长漂移量; 模场重叠因子

中图分类号: TN29 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0520003

Electrode design of electro-optic modulator based on FBG

Weng Sijun, Pei Li, Wang Jianshuai, Wang Yiqun

(Institute of Light-wave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Electro-optic modulator is one of the most important components for optical communication system. Its performance determines the transmission performance of an optical communication system. For the electrode, its structures, species and designs have a significant influence on the property of modulator. For designing and researching the electrode of novel electro-optic modulator based on FBG, the relationship among the overlap of mode field, structural parameters of electrode and FBG's center wavelength shift $\Delta\lambda$ were discussed in this paper by numerical calculation methods. It has a significance of manufacture of polymer electro-optic modulators based on FBG, and promotes the development of electro-optic modulator.

Key words: electro-optic modulator; structure of electrode; central wavelength shift; overlap of mode field

收稿日期: 2015-09-20; 修订日期: 2015-10-24

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2014YJS004); 国家自然科学基金(61275076, 61525501)

作者简介: 翁思俊(1988-), 女, 博士生, 主要从事电光调制器相关方面的研究。Email: 12111014@bjtu.edu.cn

导师简介: 裴丽(1970-), 女, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光纤通信、光纤传感、光网络、ROF 和光器件等方面的研究。

Email: lipei@bjtu.edu.cn

0 引言

光纤通信的大容量,长距离,宽带宽,超速传播等特性已使其成为现代通信网络中不可或缺的信息传输方式,它是通过电光调制转换,将电信号调制到光信号上进行传输。故而,电光调制器在光纤通信中起着关键的作用,它可将各种电信号,转换成光信号,是各种各样的电子设备和传输光纤之间的桥梁,是实现信息高速传输的关键器件之一。近些年来,又随着聚合物材料的快速发展,采用 M-Z 干涉型结构的聚合物电光调制器也已有了较大的发展。早在 1997 年就有报道称,通过采用简单微带线电极结构的聚合物调制器带宽可以达到 113 GHz^[1];2002 年 Lee 等人报道称其研究的调制器调制带宽已可高达 150 GHz 以上^[2];在带宽向着宽带发展的同时,半波电压也在逐步的降低,通过采用 M-Z 型推挽结构的电光调制器半波电压可低至 0.8 V^[3]。但 M-Z 型波导与光纤的耦合效率较低,模式匹配率不够高,且有较大的波导传输损耗;通过采取一些措施^[4]虽然可以实现调制器和单模光纤之间较好的模式匹配,但却增加了结构的复杂性及工艺制作的难度,而且小的垂直尺寸还会增大光波导与光纤之间的耦合损耗^[5]。

文中将介绍一种基于光纤布拉格光栅 (FBG)结构的聚合物电光调制器,它同基于长周期光纤光栅的聚合物电光调制器^[6-7]有相似的特性,两者实现调制的机理都是光纤光栅对外界环境敏感这一传感特性^[8-12]。基于光纤光栅的电光调制器是一种全光纤器件,其插入损耗低,集成度高;直接在光纤光栅上进行调制,可极大地降低模式失配,提高耦合效率;调制器件与光纤的连接也简单容易;由于只需在光纤光栅区域对电光聚合物作用,故而能降低调制电压、提高调制效率^[6]。文中基于 FBG 的聚合物电光调制器采用的是微带线结构电极,通过对电极结构参数、模场重叠因子以及 FBG 中心波长漂移量三者之间关系进行分析,可得到电极结构尺寸设计的基本依据。

1 电极设计

基于 FBG 结构的电光调制器的横截面如图 1 所示,主要由研磨成 D 型的 FBG 以及覆盖在其研磨侧上的 ITO 层、电光聚合物层和金属电极层组成。该

类型的电光调制器的调制原理是根据聚合物的电光特性,在微带电极的作用下,聚合物包层的折射率将发生变化并引起 FBG 中基模的有效折射率变化,而 FBG 的中心波长(λ)和有效折射率(N_{eff})有关。不同的电压会带来不同的 N_{eff} ,从而最终演变成 λ 的漂移,使得某一特定波长的输出光信号振幅变化,最终达到调制的目的。这是一种通过包层变化来改变整体的调制,即是所谓的“包层调制”^[13],但此种结构的包层调制同参考文献[13]中所说的包层调制有所不同,其芯层并未包含在微带线部分内。

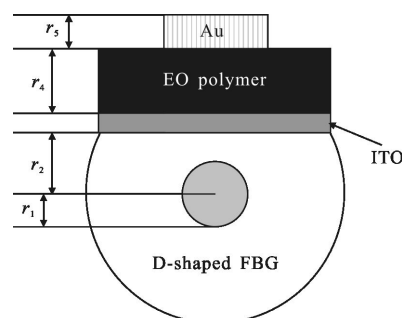


图 1 聚合物电光调制器横截面

Fig.1 Cross-section of the polymerelectro-optic modulator

1.1 模场重叠因子和电极结构的关系

一般对于调制器的电极设计,主要有两个方面^[4]:一个是尽量低的驱动电压;另一个是尽可能高的调制带宽。对于调制电压,通常会定义一个叫“模场重叠因子”的物理量来表征其大小。模场重叠因子的物理含义为:微带线上微波信号场和光信号场之间的耦合强度,其值越大,说明两者耦合越强,所需的驱动电压就越低。模场重叠因子的表达式可以写为^[13]:

$$\Gamma = \frac{D}{V} \frac{\int_{A1} E_m(x, y) E_0(x, y) dx dy}{\int_{A2} E_0(x, y) dx dy} \quad (1)$$

式中: $E_m(x, y)$ 为微波信号场分布; $E_0(x, y)$ 为光信号场分布; D 为电极间距,也即是聚合物厚度; V 为调制电压。对于一般的 M-Z 型包层调制而言^[13], $A1$ 为包层的横截面; $A2$ 为整个横截面。图 2 是微带线的横截面示意图,其中,电极间距、导体带厚度和电极宽度分别用 D, T 和 W 表示。从图中可以看出,对于 FBG 型的包层调制器来说, $A1$ 和 $A2$ 对应的都是微带线区域。

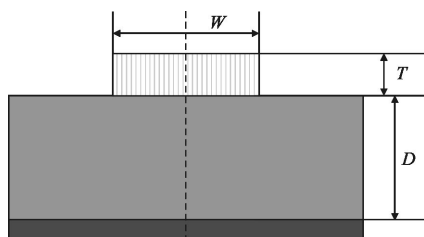


图 2 微带线横截面示意图

Fig.2 Cross-section of the microstrip line

图 3 为模场重叠因子和电极间距的关系示意图。在仿真中,电光聚合物采用的是 PMMA-AMA/MBI/AJC146 交联型聚合物^[14],其折射率为 $n=1.643$,电光系数为 $\gamma_{33}=138 \text{ pm/V}$;上电极是金属金(Au);导体带厚度 $T=3 \mu\text{m}$;特征阻抗 $Z_0=50 \Omega$,另外,为避免电光聚合物厚度过薄而使其在多层波导中的影响降低,电极间距最小取值到 $3 \mu\text{m}$ ^[6-7,15]。从图中可以看出在 T 和 Z_0 一定的情况下, D 的微小变化都会影响 Γ 。根据两者的拟合曲线可以看出, Γ 随着 D 的减小而增大。在 $3 \mu\text{m} \leq D \leq 4.7 \mu\text{m}$ 时, $\Gamma > 0.9$,即微波信号和光载波信号的能量耦合可达 90% 及以上,这是在包层调制的可接受范围内。

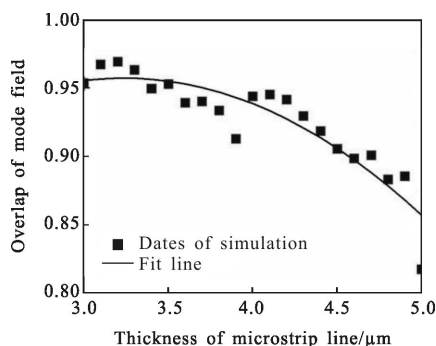


图 3 模场重叠因子和电极间距的关系

Fig.3 Relationship of overlap of mode field and thickness of microstrip line

图 4 为导体带厚度分别与模场重叠因子、电极宽度的关系示意图;在此仿真中,其他参数保持不变。从图中可以看出, T 的不同也会使得 Γ 不同;根据 Γ 和 T 的拟合曲线可以知道, Γ 整体上来说随着 T 的增大而呈现上升趋势的。由此,根据图 3 和图 4(a)可知,在电极设计中,可以通过调节电极结构参数来获得预期的模场重叠因子。另外,根据图 4(b), W 随着 T 的增加而减小,究其原因在于 T 可等效为

W 的增加量^[13]。当 Z_0 为定值,得到 W_{eff}/D 为常数;又因 W_{eff} 是 W 和 T 的等效宽度 ΔW 之和,故 T 越大, ΔW 越大,从而 W 变小。

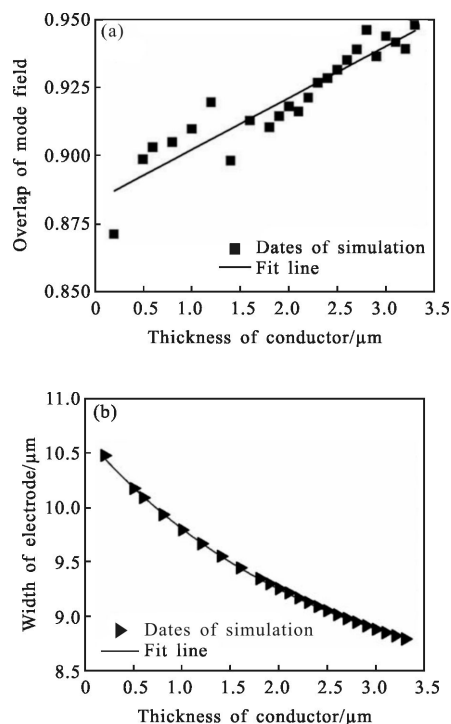


图 4 W 、 Γ 和 T 的关系 (a) Γ 和 T 的关系 (b) W 和 T 的关系

Fig.4 Relationship of W , Γ and T (a) relationship of Γ and T (b) relationship of W and T

1.2 FBG 中心波长、电极结构和模场重叠因子的关系

通过以上分析可知不同的电极结构会有不同的模场重叠因子,这意味着相同的微波电压会产生不同的驱动效果,得到不同的折射率改变量。而根据基于 FBG 的聚合物电光调制器的工作原理可知,分析讨论中心波长、电极结构以及模场重叠因子三者的关系对电光调制器的性能研究来说是十分重要的。

图 5 为电极间距分别同模场重叠因子和 FBG 中心波长漂移量的关系示意图,在此仿真中其他参数保持不变。图 5(a)是不同 D 下的 Γ ,图 5(b)是不同 D 下的 FBG 中心波长漂移量($\Delta\lambda$)。从图 5(b)中可以看出, $\Delta\lambda$ 随着 D 的变化而变化,且只有在某些特定的范围内才会表现出明显的变化。这是因为光纤布拉格光栅只有在外包层取值为某些范围内才会对外包层折射率的变化敏感^[13-14]。如图 5(a)和(b)中分别标注的两点,当 $D=3.5 \mu\text{m}$ 时,其 $\Gamma=0.9525$, $\Delta\lambda=0.251 \text{ nm}$;而当 D 增大为 $3.8 \mu\text{m}$ 时,其 $\Gamma=0.9334$, $\Delta\lambda=0.357 \text{ nm}$ 。这说明

了虽然在更小 D 的情况下, 有更大的模场重叠因子, 但此处的 FBG 折射率灵敏度不如在更大 D 处的折射率灵敏度, 从而使得 FBG 的中心波长漂移量更小。

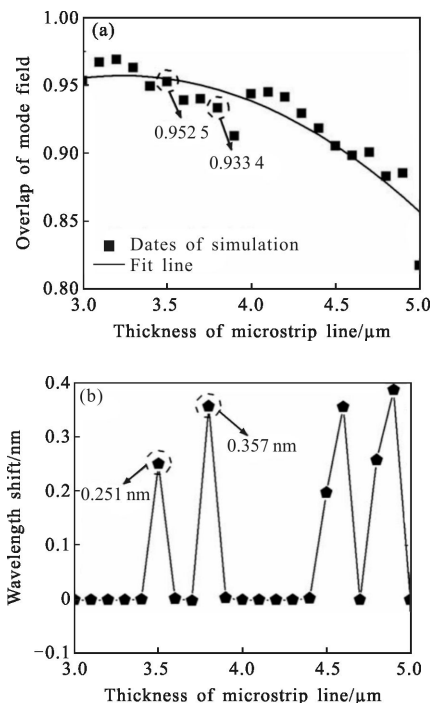


图 5 $\Delta\lambda$ 、 Γ 和 D 的关系 (a) Γ 和 D 的关系 (b) $\Delta\lambda$ 和 D 的关系
Fig.5 Relationship of $\Delta\lambda$, Γ and D (a) relationship of Γ and D (b) relationship of $\Delta\lambda$ and D

综上所述可知, 在对电极设计时, 应将电极结构、模场重叠因子以及中心波长漂移量等因素综合起来考虑, 折中选择相对较好的电极参数。如图 4 和图 5 所示, 电极间距在 $3.4 \mu\text{m} \leq D \leq 3.9 \mu\text{m}$ 或 $4.4 \mu\text{m} \leq D \leq 4.7 \mu\text{m}$ 范围取值, 导体带厚度在 $T \geq 0.5 \mu\text{m}$ 范围取值时, 既能获得大的中心波长漂移量又能有高的模场重叠因子。

2 结 论

文中对基于 FBG 的聚合物电光调制器的电极展开了分析和设计, 主要对电极结构参数、模场重叠因子以及中心波长漂移量之间的关系做了讨论。通过仿真计算发现, 在确定导体带厚度的情况下, 电极间距的变化会影响模场重叠因子的值; 而电极间距不变, 导体带厚度的不同也会使得模场重叠因子不同; 因为 FBG 的中心波长漂移量与电极间距之间的

关系是非线性和分区域的, 只有在某些特定的电极间距下中心波长漂移量才会有较大的变化, 所以在电极的设计中, 中心波长漂移量也应当作为一个重要的衡量参数来讨论。另外需要注意的是, 以上的分析都是忽略了电极损耗来进行的, 在考虑电极损耗的时候, 电极的尺寸等又会有所不同。文中的研究对基于 FBG 的电光调制器的制作具有一定的指导意义, 能够很好的促进电光调制器的发展。

参 考 文 献:

- [1] Chen Datong, Fetterman H R, Chen Antao, et al. Demonstration of 110 GHz electro-optic polymer modulators [J]. *Appl Phys Lett*, 1997, 70(25): 3335-3337.
- [2] Lee Mark, Katz H E, Erben C, et al. Broadband modulation of light by using an electro-optic polymer[J]. *Science*, 2002, 298(5597): 1401-1403.
- [3] Shi Yongqiang, Lin Weiping, David J Olson, et al. Electro-optic polymer modulations with 0.8 V half-wave voltage[J]. *Appl Phys Lett*, 2000, 77(1): 1-3.
- [4] Garner S M, Lee S S, Chuyanov V, et al. Three-dimensional integrated optics using polymers [J]. *IEEE J Quant Electron*, 1999, 35(8): 1146-1154.
- [5] Song Qiong, Wu Boyu, Zhang Bing, et al. Recent advances in high speed electro-optics polymer modulators [J]. *Laser & Infrared*, 2003, 3(1): 13-16. (in Chinese)
宋琼, 吴伯瑜, 张兵, 等. 高速聚合物电光调制器的进展 [J]. *激光与红外*, 2003, 3(1): 13-16.
- [6] Dong Xiaowei, Pei Li, Jian Wei, et al. A novel electro-optic polymer modulator based on long period fiber gratings [J]. *Optic Technique*, 2004, 30(3): 289-292. (in Chinese)
董小伟, 裴丽, 简伟, 等. 基于长周期光栅的有机聚合物高速电光调制器[J]. *光学技术*, 2004, 30(3): 289-292.
- [7] Pei Li, Dong Xiaowei, Lin Bin, et al. Study on a low loss, low voltage, polarization-independent EO modulator based LPG[J]. *Optic & Laser Technology*, 2007, 39: 442-448.
- [8] Chen Haiyun, Gu Zhengxian, Chen Xin. Characteristics of film sensor based on tilted long-period fiber gratings [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11): 3116-3121. (in Chinese)
陈海云, 顾铮先, 陈鑫. 倾斜长周期光纤光栅薄膜传感器特性研究[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(11): 3116-3121.
- [9] Sang Xinzhu, Yu Chongxiu, Yan Binbin, et al. Chemical sensor based on a fiber Bragg grating [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(5): 771-773. (in Chinese)

- 桑新柱, 余重秀, 颜玢玢, 等. 基于光纤布拉格光栅的化学传感器[J]. 光学精密工程, 2006, 14(5): 771-773.
- [10] Zhou Qian, Ning Tigang, Wen Xiaodong, et al. A fiber Bragg grating sensor for temperature-stress simultaneous measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 1024-1027. (in Chinese)
- 周倩, 宁提纲, 温晓东, 等. 一种双包层半径光纤布拉格光栅传感器[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 1024-1027.
- [11] Zhao Mingfu, Han Xi, Luo Binbin, et al. Response characteristics of refractive-index gradient based on long-period fiber gratings [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(2): 316-322. (in Chinese)
- 赵明富, 韩汐, 罗彬彬, 等. 长周期光纤光栅的折射率梯度响应特性[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 316-322.
- [12] Liang Lili, Liu Mingsheng, Li Yan, et al. Solutions of strain and temperature cross-sensitivity of long period fiber grating temperature sensing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 1020-1023. (in Chinese)
- 梁丽丽, 刘明生, 李燕, 等. 长周期光纤光栅温度传感器应变交叉敏感的研究 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 1020-1023.
- [13] Liu Zilong. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005. (in Chinese)
- 刘子龙. 聚合物电光波导调制器的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [14] Enami Y, Derosé C T, Mathine D, et al. Hybrid polymer/sol-gel waveguide modulators with exceptionally large electro-optic coefficients [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1: 180-185.
- [15] Gao Shuang. Analysis of the properties of multi-cladding waveguide in new electro-optical modulator [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- 高爽. 新型电光调制器中多包层波导特性分析 [D]. 北京: 北京交通大学, 2008.