

文章编号: 0258-7025(2007)03-0379-04

光纤聚合物电光调制器电极对波导特性的影响

王 智, 张金磊, 孟庆文

(北京交通大学理学院光信息科学与技术研究所, 北京 100044)

摘要 有机聚合物高速电光调制器是全光纤器件, 插入损耗低, 集成度高, 能极大地降低模式失配和调制电压, 提高调制效率, 是未来超长距离超大容量高速光通信系统中的关键器件之一。将一种基于长周期光纤光栅的光纤聚合物电光调制器看作 5 层均匀圆光波导, 考虑两层电极及其复折射率的实际情况, 利用紧致的超格子方法, 在复数域分析这种光纤聚合物电光调制器的波导特性。从模式折射率的实部和虚部、模场分布等角度对数值计算结果进行分析表明, 只忽略外电极对调制器的波导特性影响很小, 考虑电极时长周期光栅的谐振波长比不考虑电极时大, 从而影响调制特性。

关键词 光通信; 聚合物电光调制器; 波导; 长周期光纤光栅

中图分类号 TN 929.1 文献标识码 A

Effect of the Electrodes in an Electro-Optic Polymer Modulator on Waveguide Characteristics

WANG Zhi, ZHANG Jin-lei, MENG Qing-wen

(Institute of Optical Information, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract In the future ultra-span and ultra-capacity optical telecommunication systems, high speed electro-optic polymer modulator is one of the key components, which is an all-fiber component with low insertion loss and high integration. The modulation efficiency can be improved because this kind of modulator can greatly suppress the mode mismatching and operate at much lower modulation voltage. An electro-optic polymer modulator based on the long period grating inscribed in a silica-based optical fiber is modeled as a five-layer uniform circular waveguide, and simulated by using the compact supercell method with the consideration of the complex refractive index of the electrodes. The mode index and mode pattern can be obtained, and can be used to explain some differences of the waveguide properties or the modulator characteristics between with and without the electrodes.

Key words optical communication; electro-optic polymer modulator; waveguide; long period fiber grating

1 引言

随着用户业务需求的快速膨胀, 光纤通信技术得到飞速发展, 尤其是超大容量、超长距离密集波分复用系统 (DWDM), 单信道速率已经超过 40 Gbit/s, 最大传输距离超过 10000 km, 总容量超过 1 Tbit/s。在这些高速系统中, 主要的传输损伤来自色散、非线性效应和偏振模色散。为了消除这些

效应对传输的影响, 人们采取色散管理方法和非线性控制等手段, 其中采用新型的光调制格式也是改善系统性能的关键之一。

目前报道了大容量、长距离光纤传输系统中采用的多种新型光调制格式, 主要有基于光强度调制的归零调制 (RZ)、载波抑制归零调制 (CSRZ)、预啁啾归零调制 (CRZ)、单边带调制 (SSB)、残留边带调制 (VSB)、双二进制调制和相位整形二进制传输调

收稿日期: 2006-08-09; 收到修改稿日期: 2006-10-08

基金项目: 国家自然科学基金 (60402006, 60577020) 和北京交通大学基金 (2005SM008, 2005SZ001) 资助项目。

作者简介: 王 智 (1971—), 男, 湖北人, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为光纤传感与全光信号处理和微结构光纤技术。

E-mail: zhiwang@bjtu.edu.cn

制(PSBT);基于相位调制的差分相移键控(DPSK)、差分正交相移键控(DQPSK)和差分八级相移键控(8-DPSK);基于偏振调制的双二进制偏振位移键控(DPolSK)和比特间插偏振调制(IPDM)。这些新的调制格式能够有效地减小信道间隔,增加频谱利用率,增强光信号在传输过程中抵抗非线性效应和偏振模色散(PMD)影响的能力,更有效地提高了整个光通信系统的传输距离和容量^[1]。

高速光外调制器是实现各种新型调制格式光信号的关键器件,主要有电吸收调制器(EAM)、铌酸锂马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)调制器(LN-MZ),聚合物马赫-曾德尔调制器和砷化镓马赫-曾德尔调制器。

基于半导体的电吸收调制器具有两大缺陷:啁啾较大和输出功率较低,不适于产生复杂的调制格式,因而不适用于长距离传送系统。

铌酸锂波导的低损耗、高电光效率等特性使其在2.5 Gbit/s及更高速率的光调制器中得到越来越广泛的使用。基于马赫-曾德尔波导结构的铌酸锂行波调制器已经成为现有系统中使用最广泛的调制器。但是,铌酸锂马赫-曾德尔调制器通常驱动电压比较高、对偏振敏感,而且难与光源等光器件集成。

聚合物电光调制器是近几年出现的新型调制器,因其具有较高的电光系数,较低折射率,易于与其他材料集成等特点,受到越来越多的重视。其调制带宽、驱动电压都能达到40 Gbit/s以上超高速系统的应用水平^[2]。聚合物电光调制器已经能够实现100 GHz以上高速调制^[3,4],利用一种聚合物PSDA-AJL4,在85 °C时仍能保持很好的长期稳定性^[5]。

目前大多聚合物电光调制器仍然是波导型,文献[6]结合长周期光栅的特性和有机聚合物的优点,提出了一种新型的基于长周期光栅(LPG)的有机聚合物高速电光调制器结构,这种基于长周期光栅的聚合物调制器是全光纤器件,插入损耗低,集成度高;在长周期光栅上进行调制,不需要将光从光纤耦合到外调制器上,因此将极大地降低模式失配;由于只需在长周期光栅区域对聚合物进行电光作用,从而能降低调制电压,提高调制效率。

文献[6]利用多层光波导理论,分析了调制电压与长周期光栅谐振波长的关系。但是由于电极很薄,忽略了电极的作用。本文利用王智等提出的紧致的超格子方法(Compact Supercell Method)^[7],考虑两层电极及其复折射率的实际情况,分析了这种

光纤聚合物电光调制器的波导特性,并与忽略电极的结果进行比较,探讨了电极对光纤里的模式的影响。

2 算法模型

图1是基于长周期光栅的有机聚合物高速电光调制器结构,这种结构是由“纤芯+包层+电极+有机聚合物+电极+空气”构成的圆对称多层光波导,纤芯写有长周期光栅。当在有机聚合物上加调制电压时,有机聚合物的电光效应致使折射率变化。有机聚合物作为长周期光栅包层的一部分,其折射率的变化将导致基模与包层模的耦合发生变化,从而改变长周期光栅的透射谱和谐振峰波长。

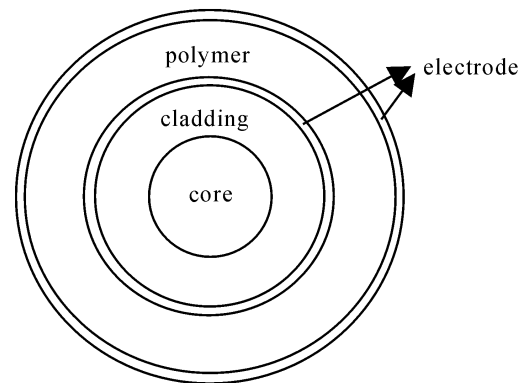


图1 光纤聚合物电光调制器波导结构横截面
Fig.1 Waveguide cross section of the fiber-based electro-optic polymer modulator

图1所示的波导结构介电常数满足对称性: $\epsilon(x, y) = \epsilon(-x, y) = \epsilon(x, -y)$,因此,可以采用文献[7]提出的紧致的超格子方法。对于本文研究的5层圆光波导结构,文献[7]中(3)式可写为

$$\epsilon_F(\mathbf{k}) = \frac{1}{A} \oint_A \epsilon_b e^{-i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} ds + \frac{1}{A} \sum_{j=1}^5 \oint_A (\epsilon_j - \epsilon_b) e^{-i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} ds = \epsilon_b \delta(\mathbf{k}) + \sum_{j=1}^5 (\epsilon_j - \epsilon_b) \left[\frac{2f_j J_1(kr_j)}{kr_j} - \frac{2f_{j-1} J_1(kr_{j-1})}{kr_{j-1}} \right], \quad (1)$$

式中 $\mathbf{r} = (x, y)$ 为位置空间坐标, $A = D^2$ 为超格子面积, D 为超格子周期, $\mathbf{k} = (k_x, k_y)$,为超格子的倒格子空间矢量,由简约布里渊区基矢 $(2\pi/D, 2\pi/D)$ 线性组合而成, $k = |\mathbf{k}|$, $k = 0$ 时(1)式按极限运算, ϵ_j 和 r_j 为第 j 层介电常数和外半径,特别地, $r_0 = 0$, $\epsilon_b = 1.0$, $f_j = \pi r_j^2/A$ 为每层的填充比, J_1 为1阶贝塞尔(Bessel)函数。

算法过程中,介电常数用余弦函数展开,展开系数可由(1)式 $\epsilon_F(\mathbf{k})$ 的组合得到,横向电场用厄米-

高斯(Hermite-Gauss)函数展开,将所有展开式与麦克斯韦(Maxwell)方程组结合可以得到关于传输常数 β 的本征值方程。由于电极材料折射率是复数,所以解本征值问题时,能直接得到复的传输常数,其实部和虚部分别对应传输时延和损耗。文献[6]忽略电极层,特征方程是关于传输常数的实数方程,并不需要如作者所说的在复数范围内求解,因此,必然导致一定的误差。

3 模式折射率与模场分布

参照文献[6]选取光纤结构参数为:芯层折射率 $n_1 = 1.462$,石英包层折射率 $n_2 = 1.457$,内电极折射率 $n_3 = 0.2644 + 1.0019i$,聚合物折射率 $n_4 = 1.6$,外电极与内电极相同, $n_5 = 0.2644 + 1.0019i$, i 为虚数单位;半径分别取 $r_1 = 4.0 \mu\text{m}$, $r_2 = 16.5 \mu\text{m}$, $r_3 = 16.6 \mu\text{m}$, $r_4 = 18.6 \mu\text{m}$, $r_5 = 18.7 \mu\text{m}$ 。

1.55 μm 时的模式折射率如图2所示,图中左右两侧分别为其实部与虚部。图中所示的前8个模式分别是 $\text{LP}_{01}^x, \text{LP}_{01}^y, \text{TM}_{01}, \text{TE}_{01}$,2个简并的 $\text{HE}_{21}, \text{LP}_{02}^x, \text{LP}_{02}^y$ 。两个简并的基模的模式折射率为 $1.459 + i6.561 \times 10^{-8}$,实部大于包层折射率,因此是束缚模,其他模式全都是泄漏模(或包层模)。光纤芯区写入长周期光栅后,基模能量向包层模耦合,并在传输过程中快速损耗,从而在透射谱上产生谐振波长处的高损耗峰。根据对称性,基模只与 LP_{0n} 模发生耦合,图3是4个低阶 LP_{0n} 模式的光强分布。计算结果表明, LP_{01} 模与 LP_{02} 模的模式折射率实部之差 Δn 约 3.329×10^{-3} ,拍长约 $465.56 \mu\text{m}$,基模传输损耗约 1.155 dB/m , LP_{02} 模的损耗约 389 dB/m 。

文献[6]指出,光栅周期 $480 \mu\text{m}$ 时,谐振波长约 1491.76 nm ,由此可得到对应两个模式的折射率

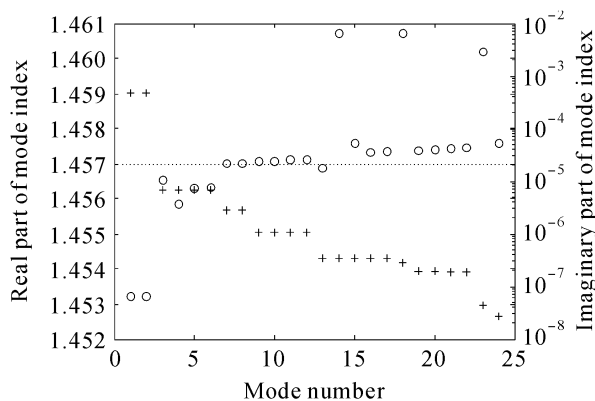


图2 模式折射率的实部(+)与虚部(O)

Fig. 2 Real (+) and imaginary (O) part of the mode index

之差 Δn 约 3.108×10^{-3} ,比本文结果略小。因此,如果长周期光栅结构相同,考虑电极时的谐振波长应该比不考虑电极的大。这与文献[8]的结论一致。

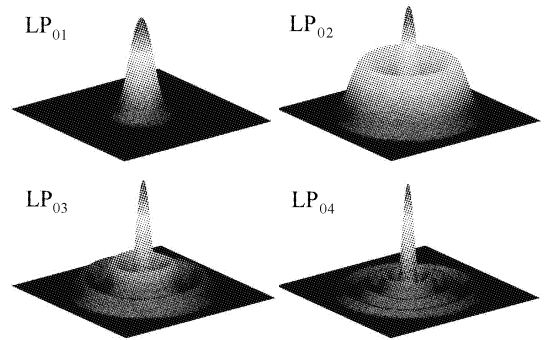


图3 模式 $\text{LP}_{01}, \text{LP}_{02}, \text{LP}_{03}, \text{LP}_{04}$ 的光强分布

Fig. 3 Intensity distribution of the modes $\text{LP}_{01}, \text{LP}_{02}, \text{LP}_{03}, \text{LP}_{04}$

4 电极对波导特性的影响

考虑实际的SMF28光纤,计算中,从光纤芯层到最外层,折射率分别取 $n_1 = 1.449$ (芯包折射率差0.36%时芯层折射率), $n_2 = 1.444$ (1.55 μm 时纯石英包层折射率), $n_3 = 0.264 + 1.0019i$ (内电极材料的折射率), $n_4 = 1.60$ (聚合物折射率), $n_5 = 0.264 + 1.0019i$ (外电极);半径分别取 $r_1 = 4.1 \mu\text{m}$, $r_2 = 16.5 \mu\text{m}$, $r_3 = 16.6 \mu\text{m}$, $r_4 = 18.6 \mu\text{m}$, $r_5 = 18.7 \mu\text{m}$ 。

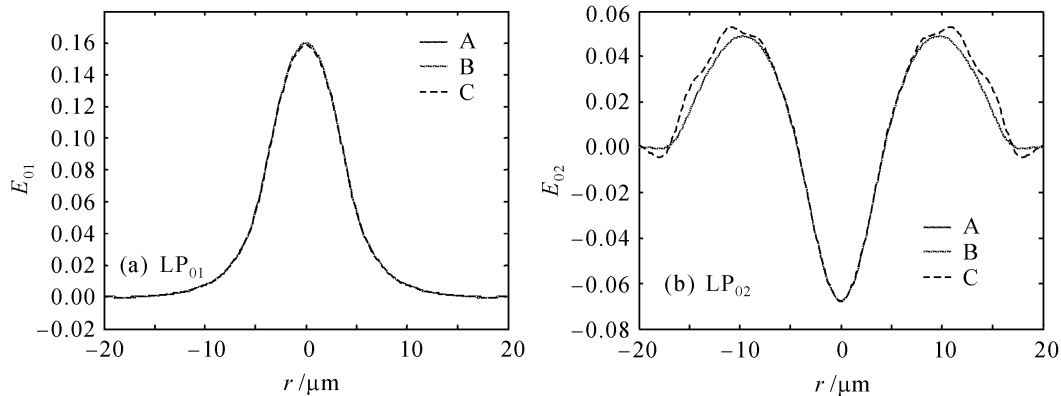
为了比较电极对调制器结构波导特性的影响,计算时按A,B,C三种结构分析,分别对应:忽略外电极、包含全部电极、忽略全部电极三种情况。1.55 μm 时 LP_{01} 与 LP_{02} 模的模式折射率和拍长如表1所示。

图4(a)和(b)分别显示三种结构的 LP_{01} 模和 LP_{02} 模沿光纤中心 x 轴的电场分布,图中也能看到不同结构对模式束缚能力的变化。对比A和B的结果发现,忽略外电极对两个模式折射率的实部几乎没有影响,因而它们的拍长也基本相同。但是,对模式折射率的虚部则影响较大一些,这是因为模式折射率的虚部主要由电极折射率的虚部决定^[9]。图4显示的A,B两种情况下的模场分布也几乎一样。

对比B和C发现,忽略全部电极,得不到关于模式损耗的信息,对基模的模式折射率实部影响仍然很小,对 LP_{02} 模的实部影响稍大一点,从而对两个模式之间的拍长影响较大,这是因为 LP_{02} 模比 LP_{01} 模有更多的模场分布在芯层以外的区域,如图4所示,更容易受到外层结构的影响。

表 1 1.55 μm 时 LP_{01} 与 LP_{02} 模的模式折射率和拍长Table 1 Mode index and beatlength of modes LP_{01} and LP_{02} at 1.55 μm

Case	LP_{01}	LP_{02}	Beatlength at 1.55 μm / μm
A	$1.446223 + i4.866562 \times 10^{-8}$	$1.442681 + i2.349842 \times 10^{-5}$	437.57
B	$1.446223 + i5.161085 \times 10^{-8}$	$1.442681 + i2.305272 \times 10^{-5}$	437.55
C	1.446222	1.442517	418.33

图 4 三种结构的 LP_{01} 模和 LP_{02} 模沿光纤中心 x 轴的电场分布Fig. 4 Electrical field distributions of modes LP_{01} and LP_{02} along the x -axis of different waveguides

将三种情况的结果进行对比发现,对于同一个模式,模式折射率的实部从 A 到 B 到 C 依次减小,这是三种结构对模式束缚能力逐渐下降的结果。

5 结 论

将一种光纤聚合物电光调制器看作 5 层均匀圆光波导,考虑两层电极及其复折射率的实际情况,利用紧致的超格子方法,分析这种光纤聚合物电光调制器的波导特性。结果表明,只忽略外电极对调制器的波导特性影响很小,考虑电极时长周期光栅的谐振波长比不考虑电极时大。从模式折射率的实部和虚部、模场分布等角度对数值计算结果进行了定性解释。

参 考 文 献

- Gu Wanyi. Optical Transmission Technology in WDM Ultra-Span Systems [M]. Beijing: Beijing University of Post and Telecommunication Press, 2006. 219~224
顾晓仪. WDM 超长距离光传输技术[M]. 北京:北京邮电大学出版社, 2006. 219~224

- C. C. Teng. Traveling-wave polymeric optical intensity modulator with more than 40 GHz of 3-dB electrical bandwidth [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**(13):1538~1540
- Datong Chen, Hardd R. Fetterman, Antao Chen *et al.*. Demonstration of 110 GHz electro-optic polymer modulators [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70**(25):3335~3337
- Datong Chen, Daipayan Bhattacharya, Anand Udupa *et al.*. High-frequency polymer modulators with integrated finline transitions and low V_{π} [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(1):54~56
- Y.-H. Kuo, Jingdong Luo, W. H. Steier *et al.*. Enhanced thermal stability of electrooptic polymer modulators using the diels-alder crosslinkable polymer [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(1):175~177
- Dong Xiaowei, Pei Li, Jian Wei *et al.*. A novel electro-optic polymer modulator based on long period fiber gratings [J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(3):289~292
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
- Wang Zhi, Ren Guobin, Lou Shuqin *et al.*. Compact supercell method based on opposite parity for Bragg fibers [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(26):3542~3549
- O. Duhem, A. DaCosta, J. F. Henninot *et al.*. Long period copper-coated grating as an electrically tunable wavelength-selective filter [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(12):1014~1016
- Ren Guobin, Wang Zhi, Lou Shuqin *et al.*. Full-vectorial analysis of complex refractive-index photonic crystal fibers [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(6):1126~1135