

文章编号: 0253-2239(2004)11-1516-5

包层调制的聚合物电光调制器及其理论分析

刘子龙 朱大庆

(华中科技大学激光技术与工程研究院集成光子器件研究室, 武汉 430074)

摘要: 器件损耗偏高是当前聚合物电光调制器的研究中需要解决的问题之一。在调制器的插损之中, 波导传播损耗(包括吸收和散射损耗)的贡献举足轻重。特别是在追求高电光系数的材料同时, 传播损耗也将会不可避免地增加。如何改善器件的损耗是聚合物调制器实用化的一个重要课题。为此提出了一种在波导包层中调制光波的设计。理论分析表明, 这种方法能够大幅度降低波导传播性能, 因而有助于改善器件损耗。由于包层中光波强度比芯层中要弱, 因此在包层中调制光波会引起场-模交叠因子的弱化, 但是优化计算发现, 通过调节波导的尺寸尤其是芯层厚度可以控制交叠因子使其弱化程度降低到最小, 在最优的情况下, 场-模交叠因子可达 0.89。随着波导传播损耗的降低, 器件调制区的长度可以做得更长, 有助于进一步降低器件的半波电压。

关键词: 非线性光学; 包层调制; 电光效应; 调制器; 聚合物

中图分类号: O437; TN202 文献标识码: A

Electro-Optic Polymer Modulators Modulated Only in Cladding and Its Theoretical Analysis

Liu Zilong Zhu Daqing

(Laboratory of Integrated Photonic Devices, Institute of Laser Technology & Engineering,
Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074)

(Received 14 November 2003; revised 23 March 2004)

Abstract: Now, higher loss in polymer modulators is one of important problems to be solved in the research of electrooptic modulators. The waveguide loss plays an important role in the insert loss. Especially, modulators will inevitably have higher waveguide loss seeking high EO coefficients. It is an important topic to improve the modulators' loss. An idea is proposed that light-wave modulated only in claddings. Analysis shows that this method can decrease largely waveguide loss, so it helps to improve the insert loss. Because the light power in claddings is weaker than one in core, the overlap will weaken when modulation is realized only in cladding. It is found that optimizing the dimensions of waveguide can largely reduce this weakening. Calculation makes the optimum overlap to 0.89. The length of interaction can increase with the decreasing of waveguide loss, which is helpful for decreasing half-wavelength voltage.

Key words: nonlinear optics; cladding modulation; electro-optical effect; modulator; polymer

1 引 言

近些年来, 基于共轭有机聚合物的电光调制器引起了人们的极大兴趣, 其主要原因来源于有机聚合物快速的非线性响应、高的非线性系数、相对较低以及几乎无弥散的介电常量能够提供信号和光载波之间近乎完美的速度匹配实现超高速的电光调制、

优良的分子可塑性使得人们可以化学合成各种各样的符合要求的有机官能团、能够和几乎所有的半导体材料兼容以及制作工艺简单等等。目前聚合物电光调制器的研究工作已经取得了长足的发展。1997年, Chen 等^[1]报道了调制带宽为 113 GHz 的聚合物调制器, 2002 年 Lee 等^[2]在 *Science* 杂志上撰文, 他们报道的调制带宽高达 150 GHz 以上。调制器半波电压是衡量器件性能的另一个重要指标。降低半波电压的一个主要途径就是设法提高材料的电光系数

E-mail: liuyu_7212@163.com

收稿日期: 2003-11-14; 收到修改稿日期: 2004-03-23

γ_{33} 。根据二能级模型,二阶光学非线性正比于发色团分子的微观超极化率 $\beta^{[3]}$ 。通过在发色团分子中引入具有较强推拉电子能力的施主电子基团或受主电子基团、增加共轭 π 键的长度以及引入复杂的芳香环或苯环都能够有效地增加发色团分子的超极化率 $^{[4]}$ 。然而,当对共轭聚合物进行极化时,具有高的分子超极化率的材料并不能获得理想的电光系数。Dalton 等人的理论分析表明,发色团之间的偶极子-偶极子相互作用降低了发色团的取向极化程度,从而导致宏观非线性并非随着分子超极化率增加而线性增加 $^{[5,6]}$ 。他们认为通过对发色团的形状进行修饰,可以有效地降低发色团之间的这种相互作用,从而有可能制备出电光系数高达 100 pm/V,半波电压低于 1 V 的电光调制器 $^{[6]}$ 。最近,他们在 *Science* 报道了一种基于推挽式工作的马赫-曾德尔式调制器,其电光系数高达 60 pm/V 以上,半波电压达到创纪录的 0.8 V $^{[7]}$ 。

尽管聚合物调制器的研究已经取得了飞速的发展,但仍然存在一些尚待解决的问题,如稳定性问题,器件的损耗问题。目前商用的调制器的主流材料仍旧是 LiNbO_3 晶体,聚合物调制器要想和 LiNbO_3 调制器一争高下,其器件损耗必须达到或低于 LiNbO_3 调制器 5~6 dB 的水平。一般认为聚合物调制器的插入损耗主要来源于与光纤的耦合损耗以及波导的传播损耗。波导的传播损耗主要包括 C-H 键的振动吸收,发色团的吸收以及因相分离导致发色团凝聚 $^{[5]}$ 和极化诱导 $^{[8]}$ 等因素引起的散射损耗。在材料的合成与制备时,高电光系数材料其发色团的共振吸收峰位置也随之红移 $^{[9]}$ 因而发色团吸收也相应增加;同时因发色团浓度的增加,也会导致散射损耗上升等等,因此设计高电光材料的同时将不可避免的引入较高的传播损耗 $^{[10]}$ 。例如,在波长 1300 nm 处,文献 $^{[7]}$ 中报道的传播损耗为 1 dB/cm(1550 nm 处是 1.6 dB/cm,根据文中的报道,其总的传播损耗占了器件损耗一半以上);文献 $^{[11]}$ 中为 1.5 dB/cm;文献 $^{[12]}$ 中是 2.5 dB/cm。然而,一般认为要使聚合物调制器的插损降到 5~6 dB 的水平必须要求波导的传播损耗下降到 1 dB/cm 以下的程度 $^{[5,6]}$ 。为了降低聚合物调制器的损耗,Garner 等 $^{[11]}$ 提出了一种垂直堆栈 (Vertically stacked) 的混合式波导结构。他们在低损耗的无源波导上面刻蚀了一层具有垂直耦合能力的有源波导结构作为信号的调制区。这种方法的主要思路就是仅在调制区使用有源的电光材料而波导的其他部分

则使用低损耗的无源材料这样可以大大降低波导损耗,同时下层无源波导的尺寸设计成能和单模光纤的模式匹配以降低器件与光纤的耦合损耗。因此这种方法的优点就是能够降低器件损耗。但是由于在波导的垂直方向附加了一层垂直耦合的有源波导,因而增加了结构的复杂性以及工艺制作的难度,例如利用反应离子刻蚀 (RIE) 刻蚀 S-形斜坡时需要严格控制气体压力、射频 (RF) 功率、刻蚀时间以及掩膜的尺寸等工艺参量。另外,这种方法由于光路的垂直耦合附加了大约 1 dB 的耦合损耗。至于聚合物材料中 C-H 键的谐振吸收可以通过掺氟或氧取代氢原子来降低 C-H 振动吸收 $^{[6,13]}$,但是聚合物和发色团的氟化处理成本通常是比较高的。

基于聚合物调制器的这种现状,在第二部分,我们提出了一种在波导的包层中调制光波的新设想。这种方法可以大幅度降低波导损耗,因而有助于改善器件损耗,而且该方法不需要引入特别的工序,因而工艺比较简单。第三部分中我们从理论上论证了这种方法的可行性。

2 包层调制

目前,聚合物电光调制器的波导芯层通常都是由电光材料组成,其包层材料采用非电光的聚合物。因此光波的调制是通过芯层实现的(为了表述的方便,我们不妨称之为芯层调制)。由于光能量主要约束在芯层中传播,因此这种方式对光的损耗是比较大的。考虑到现行的调制器多采用马赫-曾德尔干涉仪的结构,但通常器件的调制区只是马赫-曾德尔结构两平行直波导的一部分,在波导的其他部分不需要进行调制,却仍然使用了有源的电光材料来制作波导,这也是导致波导传播损耗较高的一个原因。显然如果在这些非调制区用低损耗的无源波导代替有源波导,那么波导的传播损耗就会降低。Garner 等 $^{[11]}$ 的做法正是如此,然而如我们在上面提到的那样,他们的这种做法不仅增加了波导结构的复杂性和制作工艺上的要求,而且用于耦合的锥形波导附加了大约 1 dB 的耦合损耗。如果我们换一种思路,将电光材料从芯层中“挪到”包层,芯层则选用低损耗的无源材料,那么问题便迎刃而解。包层中的电光材料由于电光效应折射率发生变化,按照一次电光效应的理论,这种折射率的变化只随信号电场独立的变化,通过波导结构的约束,包层材料折射率变化引起了导模传播常数或者波导有效折射率变

化,实现对光波的相位调制。为了区别,我们称这种方式为包层调制。毫无疑问,在包层中传播的光能量大大小于芯层,因此这种情况下,传播损耗中来源于电光材料的贡献(发色团吸收,C-H 振动吸收和各种散射损耗)必然会大幅度的下降,因而可以预期传播损耗将得到有效改善,理论计算表明大约降低到原来的 1/3 左右。由于整个波导芯层都是单一的低损耗无源材料,因此在非调制区部分的传播损耗也得到改善。和文献[11]中的做法相比较,在波导的非调制部分芯层材料都是低损耗的无源材料;但在调制区,我们提出的波导结构芯层仍然是无源的,而文献[11]中则是电光材料,有着本质的区别。因此与之相比,本文的方法在传播损耗上肯定要更低。

这种包层调制的方法,从波导结构上讲仍然是传统的三层堆栈(Stack)的结构,制作工艺上不需要附加特别的工序,因此在结构上以及工艺上都是比较简单的。

如上文所述,聚合物调制器的波导传播损耗依然偏高,特别是使用高非线性的电光材料时,情况更加突出。当采取一些措施如利用过渡锥形波导结构、垂直堆栈的混合式波导结构^[9,11]等可以使得调制器和单模光纤之间实现较好的模式匹配,从而使得与光纤的耦合损耗可以达到接近 1 dB 的水平^[7]。此时波导的传播损耗在器件的插损中就占据了相当的比重。例如,文献[7]中报道的器件传播损耗占了插损的 50%。在这样的情况下,器件的相互作用长度(调制区)受到限制,典型值是 2 cm 左右。如果采用包层调制,波导传播损耗能够有效地降低,这意味着器件调制区长度可以做得更大,半波电压因而能够进一步的降低。

3 理论分析与计算

3.1 场-模交叠因子

包层调制的聚合物电光调制器,由于包层中光的强度相对较弱,势必影响信号场和载波场(光波)之间的相互作用,即场-模交叠因子,使得两者之间的交叠减弱,不利于信号调制。但是我们有可能通过对波导的结构做出优化来尽量地减弱这种不利影响。

场-模交叠因子可以写成^[14]

$$\Gamma = \frac{D}{V} \frac{\iint_{A_1} E_m(x, y) E_{0z}^*(x, y) dx dy}{\iint_{A_2} E_{0z}^*(x, y) dx dy}, \quad (1)$$

式中 D 为电极间距, V 是信号电压, E_m 为信号场分布, E_{0z} 为横向光场分布的 z 分量,积分区域 A_1, A_2 分别为调制区和波导的横截面。为了计算交叠因子,考虑如图 1 所示的调制器结构。图 1 中,电极材料是 Au,电光聚合物的折射率 1.622,包层和芯层之间的相对折射率差 0.7%,使用波长是 1550 nm。由于只是理论上的分析计算,因此我们并不关心材料之间的兼容性问题,而只要给出材料的折射率以及相对折射率差等。计算时,只考虑 TM 模(下同),其基模场的横向分布 E_{0z} 采用 Marcatili 近似^[15]得到,信号场分布 E_m 采用惠勒变换^[16]得到。

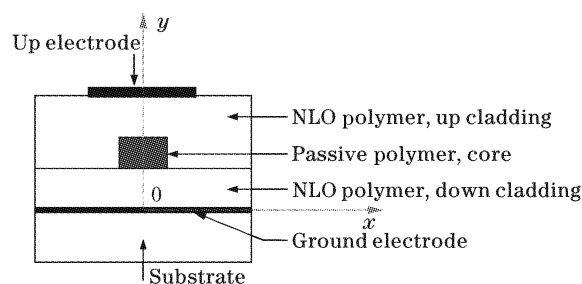


Fig. 1 Cross-section of electro-optic waveguide polymer modulator with modulation only in cladding

在此基础上,对(1)式采用遗传算法^[17]进行优化计算,得到优化的电极和波导参量,具体结果在表 1 中给出。优化过程中要求:1) 单模传输;2) 包层的厚度大于 $3.5 \mu\text{m}$ 以消除电极对导模的损耗;3) 电极特征阻抗为 50Ω 的匹配值。从表 1 中发现电极参量对场-模交叠因子的影响不大,因而很难通过控制电极参量来增加交叠因子。图 2 表明了波导的尺寸尤其是芯层厚度 T 对交叠因子的影响较大,图中当 T 从 $1.2 \mu\text{m}$ 增加到 $4.0 \mu\text{m}$ 时,对应的交叠积分由 0.89 减小到 0.65。这意味着通过合理调节波导参量可以增加场-模之间的交叠。优化计算给出芯层宽度 $2.5 \mu\text{m}$,厚度 $1.2 \mu\text{m}$ 时,交叠因子为 0.89。和芯层调制比较(其场-模交叠因子约在 0.8~1.0 之

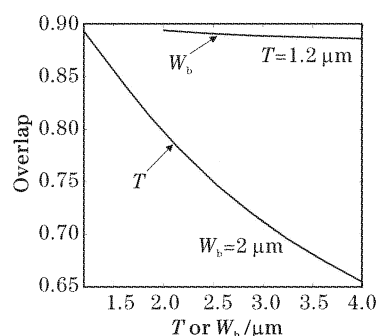


Fig. 2 Overlap as a function of t core's width (W_b) and thickness (T)

间),这个优化值是比较理想的。当与单模光纤耦合时,若只考虑模式不匹配,则耦合效率 η 可以写成^[18]

$$\eta = 0.93 \left\{ \frac{4(\omega/a)^2}{[(\omega/a)^2 + \epsilon][(\omega/a)^2 + 1/\epsilon]} \right\}, \quad (2)$$

式中 $\omega = \sqrt{\omega_x \omega_y}$, $\epsilon = \omega_x/\omega_y$, ω_x, ω_y 分别为 x, y 方向基模模场半径。 a 为单模光纤的模场半径。假定单模光纤的光斑直径 $9 \mu\text{m}$, 根据优化后的波导基模模场半径 $\omega_x = 2.6 \mu\text{m}, \omega_y = 3.5 \mu\text{m}$, 则可以算得 $\eta = 0.78$, 这样的结果应该比较好的。因此,只要我们能够合理的调节波导尺寸就可以使得包层调制时场-模交叠因子不至于引起大的降低。

Table 1 The results of optimal Γ

Numbers	1	2	3	4
Electrode width $W / \mu\text{m}$	25.0	30.0	35.0	40.0
Electrode gap $D / \mu\text{m}$	10.5	12.4	14.2	16.1
Electrode thickness $t / \mu\text{m}$	7.7	7.7	7.8	7.8
Core's width $W_b / \mu\text{m}$	2.5	2.5	2.5	2.5
Core's thickness $T / \mu\text{m}$	1.2	1.2	1.2	1.2
Overlap integral Γ	0.890	0.892	0.893	0.894

3.2 波导传播损耗的计算

在追求材料的高电光系数的同时将不可避免地引起传播损耗的增加,当传播损耗增加到 1 dB/cm 以上时,就必须设法加以改善。包层调制是一种简单有效的方法。表 2 分别给出了几种不同的材料损耗(吸收和散射损耗)情况下,包层调制和芯层调制下的波导传播损耗的计算结果。

Table 2 Propagation loss of waveguides. α_{b1} and α_{b2} are propagation loss in the case of modulation in claddings and core, respectively. α_m is the power attenuation coefficient of EO polymer. W_b, T, Γ can be seen in Table 1

$\alpha_m / (\text{dB/cm})$	1.5	3	4	5	6
$W_b / \mu\text{m}$	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
$T / \mu\text{m}$	4.0	3.9	4.0	4.0	4.0
α_{b1} / dB	0.4	0.77	0.91	1.03	1.12
α_{b2} / dB	1.0	2.02	2.58	3.07	3.52
$\alpha_{b1} / \alpha_{b2}$	1/2.5	1/2.62	1/2.84	1/2.98	1/3.14
Average of $\alpha_{b1} / \alpha_{b2}$			1/2.80		
Γ			0.65		

计算时波导的长度设为 1 cm 。结果显示包层调制时,波导传播损耗下降到芯层调制的 $1/3$ 左右。但是计算发现此时的场-模交叠只有 0.65 , 不是最优的。这不难理解,因为包层中分布的光越弱,那么包

层调制下传播损耗也相应减弱,而场-模交叠也随之减弱。因此波导的传播损耗与场-模交叠因子是相互制约的,这就要求在具体的器件设计时对两者必须综合考虑,以寻求一个最佳折中的结果。

3.3 器件的半波电压

半波电压是衡量器件性能的一个重要指标,由于材料研究方面的进展,现在可以实现 1 V 以下的半波电压^[7]。通常半波电压定义为信号频率接近零时,产生 π 相位变化所需要的输入电压^[2,7]:

$$V_\pi = \frac{\lambda D}{n_{\text{opt}}^3 \gamma_{33} L \Gamma}, \quad (3)$$

其中 D 为电极间距; L 为相互作用长度; n_{opt} 光波折射率; γ_{33} 电光系数; Γ 为场-模交叠因子。需要注意的是,在高频区,由于电极的导体损耗以及信号与光载波之间的速度失匹会导致半波电压 V_π 随调制频率增加。因此(3)式应用到高频率时,需要做出相应的修正。对于确定的电光材料和电极间距 D (波导的总厚度),半波电压 $V_\pi \propto 1/(L\Gamma)$ 。前面我们已经表明在包层调制下波导的传播损耗下降到芯层调制的 $1/3$ 左右,这意味若保持传播损耗不变,则调制区长度 L 可以增加原来的 3 倍。考虑到这时的场-模交叠因子只有 0.65 , 如果认为芯层调制下场-模交叠因子最大为 1 , 那么两者的比 $0.65 : 1$ 。因此包层调制时,如果保持与芯层调制相同的传播损耗,则半波电压可以降低到原来的 $1/2$, 即半波电压可以下降一半。

结论 通过理论分析,相比于芯层调制,包层调制的聚合物波导型电光调制器的传播损耗大约只有前者的 $1/3$, 因此包层调制对于改善器件的插损是很有利的。由于包层中光波以消逝场的形式存在,因此包层调制时信号场与光场的交叠作用将会减弱,优化计算表明通过调节波导的尺寸尤其是芯层厚度可以控制场-模交叠因子,使其弱化程度能够降低到最小。在最优的情况下,包层调制和芯层调制两种情况下交叠因子的比为 $0.89 : 1$ 。伴随着波导传播损耗的降低,器件调制区的长度可以更长,有助于进一步降低半波电压。

参 考 文 献

- 1 Chen Datong, Fetterman H R, Chen Antao *et al.*. Demonstration of 110 GHz electro-optic polymer modulators. *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.

- Science*, 2002, **298**(5597): 1401~1403
- 3 Singer K D, Kuzyk M G, Holland W R *et al.*. Electro-optic phase modulation and optical second-harmonic generation in corona-poled polymer films. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **53**(19): 1800~1802
 - 4 Amano M, Kaino T. Second-order nonlinearity of a novel diazo-dye-attached polymer. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(12): 6024~6028
 - 5 Robinson B H, Dalton L R, Harper A W *et al.*. The molecular and supramolecular engineering of polymeric electro-optic materials. *Chem. Phys.*, 1999, **245**(1): 35~50
 - 6 Dalton L R. Realization of sub 1 V polymeric EO modulators through systematic definition of material structure/function relationships. *Synthetic Metals*, 2001, **124**(1): 3~7
 - 7 Shi Y, Zhang C, Zhang H *et al.*. Low (sub-1-volt) halfwave voltage polymeric electro-optic modulators achieved by controlling chromophores shape. *Science*, 2000, **288**(5463): 119~122
 - 8 Teng C C, Mortazavic M A, Boudoughian G K. Origin of the poling-induced optical loss in a nonlinear optical polymeric waveguide. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **66**(6): 667~669
 - 9 Watanabe T, Hikita M, Amano M *et al.*. Vertical stacked coupler and serially grafted waveguide: Hybrid waveguide structure formed using an electro-optic polymer. *J. Appl. Phys.*, 1998, **83**(2): 639~649
 - 10 Steier W H, Chen A, Lee S S *et al.*. Polymer electro-optic devices for integrated optics. *Chem. Phys.*, 1999, **245**(3): 487~506
 - 11 Garner S M, Lee S S, Chuyanov V *et al.*. Three-dimensional integrated optics using polymers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1999, **35**(8): 1146~1154
 - 12 Lee S S, Garner S M, Chuyanov V *et al.*. Optical intensity modulators based on a novel electrooptic polymer incorporating a high $\mu\beta$ chromophore. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2000, **36**(5): 527~531
 - 13 Yoshimura R, Hikita M, Tomaru S *et al.*. Low-loss polymeric optical waveguides fabricated with deuterated polyfluoromethacrylate. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(6): 1030~1036
 - 14 Nishihara H, Haruna M, Suhara T. *Optical Integrated Circuits*. Ohmsha Ltd., 1985
 - 15 Yee Peida, Wu Yizun. *Basic Theories of Optical Waveguides* (光波导技术基本理论). Beijing: People's Post & Telecommunication Publishing Housing, 1981 (in Chinese)
 - 16 Wheeler H A. Transmission line properties of parallel wide strips separated by conformal mapping approximation. *IEEE Trans.*, 1964, **MTT-12**(3): 280~289
 - 17 Zhou Min, Sun Shudong. *The Theory and Applications of Genetic Algorithm* (遗传算法原理及应用). Beijing: National Defense Industry Press, 1999. 6 (in Chinese)
 - 18 Shen Qishun, Gong Xiaocheng, Qu Wenyong. Research on coupling loss between the single mode optical fiber and the LiNbO₃ waveguide. *J. Appl. Sci.* (应用科学学报), 1994, **12**(3): 218~223 (in Chinese)