

基于 Wheeler's Conforming Mapping 扩展变换法的 聚合物电光调制器特性研究*

文 玥[†] 张晓霞 黄春阳 沈 杰

(电子科技大学光电信息学院, 成都 610054)

(2010 年 11 月 15 日收到; 2010 年 12 月 28 日收到修改稿)

基于 Wheeler 变换模型, 提出了一种分析多层介质微波特征参数的方法——Wheeler's Conforming Mapping 扩展变换法, 并利用该方法得到了微波特征参数与多层介质参数之间的表达式, 在此基础上分析了微带电极的微波特性参数. 与准静态有限元法 (QS-FEM) 相比, Wheeler's Conforming Mapping 扩展变换法不仅计算准确而且具有更高的计算效率. 将该方法应用于聚合物电光调制器的特性研究, 对传统模型进行改进, 通过添加补偿层来调整微波等效折射率和特征阻抗, 改善微波与光波有效折射率的失配度, 在理论上实现了聚合物电光调制器的速率和阻抗的同时匹配.

关键词: Wheeler 扩展变换法, 微带电极, 特征参数, 等效介电常数

PACS: 42.82.-m

1. 引 言

随着通信技术的飞速发展, 尤其在微波光通信领域, 随着信号频率的增加, 调制器必须具有高速、宽带宽、低损耗等特性^[1-4]. 聚合物电光材料具有较低的介电常数, 并且从微波到红外波段几乎无色散, 在高速调制方面得到越来越广泛的关注^[5-7]. 微波信号光调制的本质是微波电场引起光波导材料的电致折射率改变, 光场经过波导时将产生相位、振幅或频率的变化, 实现微波信号的光调制. 微波与光波相互作用^[8]的理想条件是光波导对微波和光波所呈现的折射率相等, 即达到速率匹配^[9]. 传统 LiNbO₃^[10] 等无机电光材料对光波的折射率比较大, 存在固有的速率失配, 限制了带宽. 而聚合物在速率匹配方面有很好的特性, 如 DR1/PMMA^[11], 可以实现宽带宽的调制, 已经报道的带宽可达到 150 GHz^[12]. 聚合物具有很高的电光系数, 是传统电光材料 LiNbO₃ 无法比拟的, 可以高达 150 pm/V, 器件的半波电压很低, 目前已有半波电压达到 0.8 V 的报道^[13].

微带电极是一种用于调制器设计的行波电极

结构, 微波信号分布在由空气和介质组成的混合介质中. 目前, 求解微带电极模型的方法主要有数值法和解析法两大类, 数值法有变分法^[14,15]、格林函数法^[16]等, 解析法主要是保角变换法. 数值法能得到较精确的计算结果, 但计算方法复杂, 效率不高, 不能清晰的看出各种几何结构参数对特征参数的影响, 而保角变换法能直观地得出微带特征参数与各种结构参数的关系. Wheeler 变换^[17]具有过程简单、易于计算等特点. 本文研究了多层介质微带电极模型的 Wheeler 变换过程, 将微带电极和地电极之间只有一层介质的情况推广到包含任意层数的情况, 得到了各层介质的局部参数对特征参数的影响. 多层介质的 Wheeler 变换模型对微带电极模型具有普适性, 本文将该种分析方法应用到单臂微带调制的 M-Z 型聚合物调制器中, 模拟结果显示通过添加了速率补偿层这种方法可以有效的使聚合物电光调制器的微波速率与光波速率达到很好的匹配, 并且同时也可以使阻抗值达到理想值 50 Ω. 添加了速率补偿层这种方法与单纯的优化电极结构与波导结构方法相比, 在速率匹配方面的改善更加明显.

* 国家高技术研究发展计划 (新材料领域) (批准号: 2009AA03Z413) 资助的课题.

[†] E-mail: wy0856@yahoo.com.cn

2. 多层介质的 Wheeler 扩展变换法模型

多层介质 Wheeler 变换模型如图 1 所示, 各层介质及其边界从复平面 $z = x + jy$ 变换到复平面 $g = u + jv$, 由图 1(a), 粗黑线代表电极, 电极间填充 n 层介质, 微带电极上方有 $m + 1$ 层介质, 第 $m + 1$ 层介质为空气层, 介电常数为 ϵ_0 . 虚线表示介质的边界, 假设各层介质均匀分布并且各向同性, 相对介电常数分别为 $\epsilon_{r(i)}$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n + m$), 各层介质上边界与接地电极的距离为 h_i , 两电极间的间距为 h , 微带电极宽度为 W , 厚度为 t , 如图 1(b) 所示. S_c 为变换在 g 平面的矩形区域的总面积, S_i 为各层介质的面积, $q_i = S_i/S_c$ 为填充因子, 微波特征参数可以由各层填充因子 q_i 来表征. 由图 1(b) 和(c) 可知, 微带电极与空气层之间的介质变换在 u_e 的左边区域, 微带电极与接地电极之间的介质层变换在 u_e 的右边区域, $u_e = \text{ch}^{-1}\left(\frac{W}{2} - 1 + \ln\left[\pi e\left(\frac{W}{\pi}\right) + 0.94\right]\right)$ 为分界线与 u 轴的交点. 考虑微带电极厚度 t 时, 可将厚度等效成电极宽度的展宽, 等效宽度 w_{eff} 为

$$w_{\text{eff}} = W + \frac{t}{\pi} \left(1 + \ln \frac{2h}{t}\right), \quad (1)$$

在研究微带电极时, W/h 是个较重要的参数, 宽微带线 ($W/h \geq 1$) 和窄微带线 ($W/h < 1$) 具有的特征参数迥异, 因此, 必须分开讨论. 对于宽微带线, 通过多层介质的 Wheeler 变换过程, 可以得到各层填充因子 q_i 的表达式为

$$q_1 = \frac{S_1}{S_c} = \frac{1}{2} \cdot \frac{h_1}{h} \left[1 + \frac{\pi}{4} - \frac{h}{w_e} \ln \left(\frac{\pi}{h} \cdot w_e \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{h_1}{h}\right)}{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{h_1}{h}} \right) + \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{h_1}{h}\right) \right], \quad (2)$$

$$q_2 = \frac{S_2}{S_c} = \frac{1}{2} \cdot \frac{h_2}{h} \left[1 + \frac{\pi}{4} - \frac{h}{w_e} \ln \left(\frac{\pi}{h} \cdot w_e \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{h_2}{h}\right)}{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{h_2}{h}} \right) + \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{h_2}{h}\right) \right] - q_1, \quad (3)$$

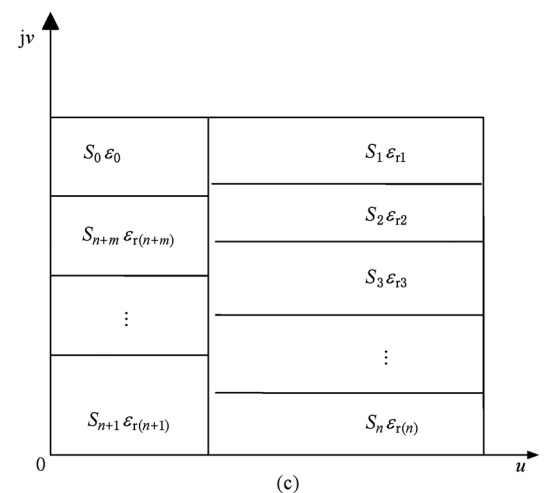
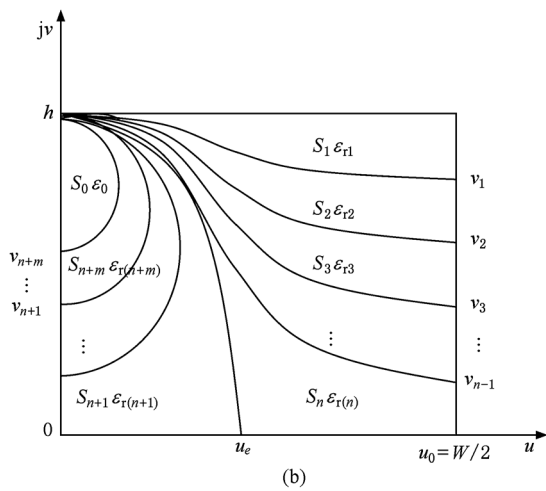
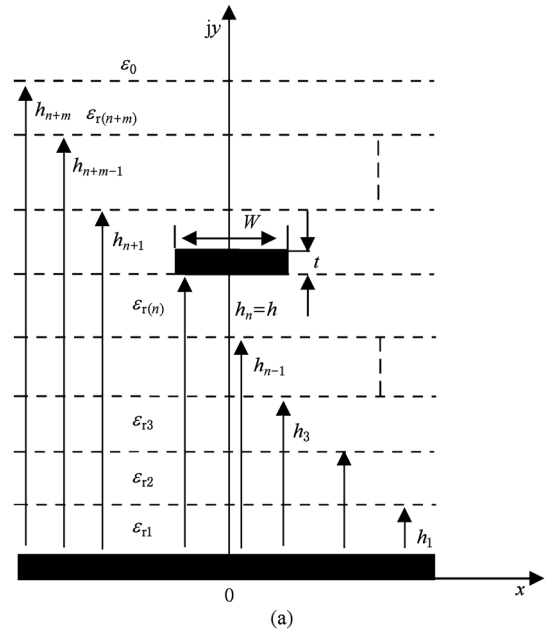


图 1 多层介质微带电极模型的 Wheeler 变换 (a) z 平面; (b) g 平面; (c) g 平面

$$q_{n-1} = \frac{S_{n-1}}{S_c} = \frac{1}{2} \cdot \frac{h_{n-1}}{h} \left[1 + \frac{\pi}{4} \times \left[1 + \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2} \cdot \arccos \left(\frac{h}{h_1} \right) \times \frac{w_e}{8h} \sqrt{\frac{1+h_1/h}{1-h_1/h+w_e/4h}} \right] \right] - \frac{h}{w_e} \ln \left(\frac{\pi}{h} \cdot w_e \frac{\sin \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{h_{n-1}}{h} \right)}{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{h_{n-1}}{h}} \right) + \cos \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{h_{n-1}}{h} \right) - \sum_{i=1}^{n-2} q_i, \quad (4)$$

$$q_n = \frac{S_n}{S_c} = \frac{S_c - \sum_{j=0}^{n-1} S_j}{S_c} = 1 - \sum_{j=0}^{n-1} q_j, \quad (5)$$

$$q_0 = \frac{S_0}{S_c} = \frac{1}{2} \cdot \frac{h - v_{n+m}}{w_e} \times \ln \left[\pi \frac{w_e}{h} \frac{\cos \left(\frac{v_{n+m}}{2} \cdot \frac{\pi}{h} \right)}{\pi \left(\frac{h_{n+m}}{h} - \frac{1}{2} \right)} \right] + \sin \left(\frac{v_{n+m}}{2} \cdot \frac{\pi}{h} \right), \quad (6)$$

$$q_{n+2} = \frac{S_{n+2}}{S_c} = \frac{1}{2} \cdot \frac{h - v_{n+2}}{w_e} \times \ln \left[\pi \frac{w_e}{h} \frac{\cos \left(\frac{v_{n+2}}{2} \cdot \frac{\pi}{h} \right)}{\pi \left(\frac{h_{n+2}}{h} - \frac{1}{2} \right)} \right] + \sin \left(\frac{v_{n+2}}{2} \cdot \frac{\pi}{h} \right) - \sum_{i=3}^m q_{n+i}, \quad (7)$$

$$q_{n+1} = \frac{S_{n+1}}{S_c} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\ln \left(\pi \frac{w_e}{h} - 1 \right)}{\frac{w_e}{h}} - \sum_{i=2}^m q_{n+i}, \quad (8)$$

式中 $v_{n+m} = 2 \frac{h}{\pi} \arctg \left[\frac{\pi}{\frac{\pi}{2} \frac{w_e}{h} - 2} \left(\frac{h_{n+m}}{h} - 1 \right) \right]$, 其中 $m > 1$.

对于窄微带线, 同样可以得到各层的填充因子 q_i 的表达式如下:

$$q_1 = \frac{S_1}{S_c} = \frac{\ln \left(\frac{1+h_1/h}{1-h_1/h+w_e/4h} \right)}{2 \cdot \ln \frac{8h}{w_e}} \times \arccos \left\{ \left[1 - \frac{h}{h_{n+1}} \cdot \left(1 - \frac{w_e}{8h} \right) \right] \times \sqrt{\frac{1+h_{n+1}/h}{h_{n+1}/h+w/4h-1}} \right\} - \sum_{i=3}^m q_{n+i}, \quad (14)$$

$$q_{n+1} = \frac{S_{n+1}}{S_c} = \frac{1}{2} - \frac{0.9}{\pi \ln \frac{8h}{w_e}} - \sum_{i=2}^m q_{n+i} - q_0. \quad (15)$$

以上各式中

$$w_e = w_{\text{eff}} + \frac{2h}{\pi} \ln \left[17.08 \left(\frac{w_{\text{eff}}}{2h} + 0.92 \right) \right].$$

由上述表达式可知,填充因子 q_i 与各层介质的结构和材料参数有关,这就将特征参数与多层介质模型的局部参数关联起来. 多层介质模型的微波等效介电常数 ϵ_{eff} 与填充因子 q_i 之间的关系为

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\left(q_0 + \sum_{i=1}^m q_{n+i} \right)^2}{\frac{q_0}{\epsilon_0} + \sum_{i=1}^m \frac{q_{n+i}}{\epsilon_{r(n+i)}}} + \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{\sum_{i=1}^n \frac{q_i}{\epsilon_{r(i)}}}, \quad (16)$$

多层介质模型的微波等效介电常数 ϵ_{eff} 有两部分组成,等号右边第一项表示微带电极上方各层介质对 ϵ_{eff} 的作用,第二项表示微带电极与地电极之间的各层介质对 ϵ_{eff} 的作用. 在已知各层介质结构参数 (h_i) 和相对介电常数 ($\epsilon_{r(i)}$) 的情况下,利用该式可计算出具有任意多层介质的微带电极特征参数:微波等效折射率 (n_m) 和特征阻抗 (Z_m). 微带电极的特征参数与等效介电常数的关系式为

$$n_m = \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}, \quad (17)$$

$$Z_m = \begin{cases} \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \cdot \frac{h}{w_{\text{eff}}}, & W/h \geq 1, \\ \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \cdot \ln \frac{8h}{w_{\text{eff}}}, & W/h < 1. \end{cases} \quad (18)$$

3. 多层介质模型的应用研究

3.1. 微带电极特征参数分析

对于单臂微带调制的 M-Z 型聚合物调制器,可以利用前文推导的多层介质的 Wheeler 变换表达式分析其特征参数. 微带电极与地电极之间分别填充了上包层、芯层和下包层三种均匀介质材料,具有不同的相对介电常数,微带电极上方只有介电常数为 ϵ_0 的空气层. 波导芯层材料为 DR1/PMMA,工作波长为 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 时的折射率为 $n_2 = 1.550$,微波介电常数为 2.3; 下包层材料为 UV15, 波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 时折射率为 $n_1 = 1.501$; 上包层材料为 UV11-3, 波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 时折射率为 $n_3 = 1.506$. 上下包层材料的微波相对介电常数均为 2.5, 如图 2 所示. 采用上述聚合物材料,根据单模传输条件和有效折射率法,设计脊型波导结构参数为:上包层厚度 $4.3 \mu\text{m}$,下包层厚度 $4 \mu\text{m}$,芯层厚度 $1.2 \mu\text{m}$,

脊高 $0.5 \mu\text{m}$,脊宽 $4 \mu\text{m}$,此时的光波有效折射率为 1.527.

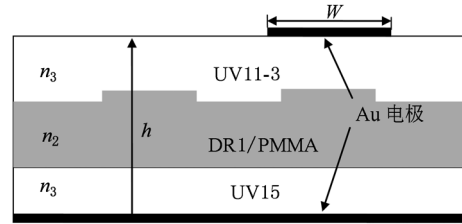


图 2 单臂微带调制的 M-Z 型聚合物调制器

对窄微带线 ($W/h \leq 1$) 分析的结果如图 3 所示,此时 $W/h = 0.8$,电极间距为 $10 \mu\text{m}$. 在随着电极厚度 t 变化的过程中, Z_m 和 n_m 的变化趋势相反, Z_m 的最小值为 74Ω , 远大于理想的特征阻抗值 50Ω ; n_m 在变化过程中的最大值为 1.418 也小于光波的有效折射率 1.527. 因此在窄电极情况下通过简单的电极设计很难达到阻抗和速率的同时匹配. 为了证明计算的准确可靠性,将 Wheeler 扩展变换法得出的结果与准静态有限元法的结果相比较,结果相符,如图 3 所示.

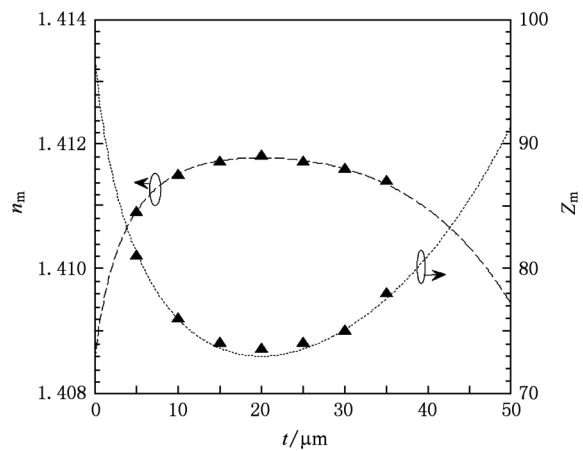


图 3 微波的有效折射率和特征阻抗随电极厚度的变化 (▲: 准静态 FEM 法; 线形: Wheeler 扩展变换法)

宽微带电极 ($W/h \geq 1$) 的分析结果如图 4 和图 5 所示,电极间距仍为 $10 \mu\text{m}$,微带电极厚度为 $5 \mu\text{m}$. 由图 4 可见 Z_m 和 n_m 随电极宽度 W 单调变化,变化趋势相反. 当 $W = 25 \mu\text{m}$ 时, $Z_m = 49.9 \Omega$, $n_m = 1.444$. 在这种情况下,特征阻抗已经接近理想值 50Ω ,但是微波的有效折射率仍然不能与光波的有效折射率相匹配,速率失配度较大. 结合图 4 和图 5,在宽微带电极的情况下适当的选择电极宽度 W

以及电极厚度 t 是可以有效的调节特征阻抗的值, 但是这两个参数的改变对于微波有效折射率的提高却不明显, 微波的有效折射率变化范围为 1.41—1.48, 仍限制了聚合物电光调制器的 3 dB 带宽.

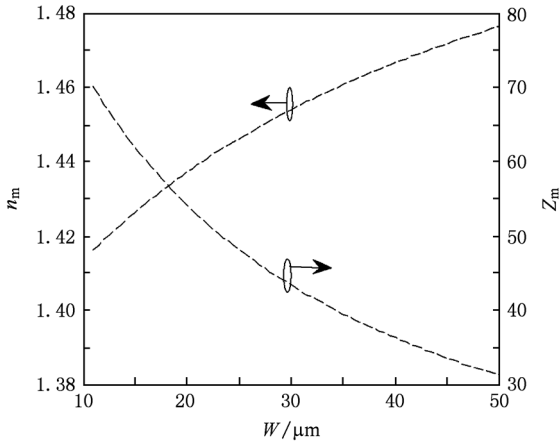


图4 微波的有效折射率和特征阻抗随电极宽度的变化

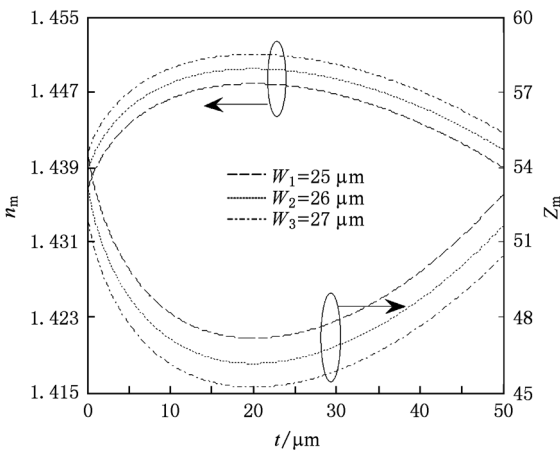


图5 微波的有效折射率和特征阻抗随电极厚度的变化

简单的单臂微带调制模型中, 由于微带电极暴露在空气中, 一部分微波信号电场将分布于空气层中, 使微带电极两侧介质的相对介电常数差异较大, 导致微波等效介电常数较小, 与光波速率之间存在较大的失配, 但在宽带电极时能达到 50Ω 的特征阻抗. 因此, 要实现速率和阻抗的同时匹配, 需要保持 Z_m 在 50Ω 附近, 同时将 n_m 提高到光波有效折射率 ($n_{\text{eff}} = 1.527$) 的水平.

3.2. 速率补偿层模型的微带特征参数分析

根据前文的分析, 在宽微带电极结构基础上再

适度提高微波等效折射率就能达到速率和阻抗的同时匹配, 为此本文提出了一种速率补偿层微带电极模型来解决光波与微波速率失配的问题. 将微带电极暴露在另一种介质中, 即在微带电极上方覆盖一层补偿层, 采用 Wheeler 扩展变换法进行特征参数的计算, 在 Wheeler 扩展变换理论模型中取 $n = 3$, $m = 1$. 补偿层厚度为 h_{add} , 相对介电常数设为 ϵ_{r4} , 这恰好为补偿层模型的 Wheeler 变换增加了两个设计自由度, 如图 6 所示.

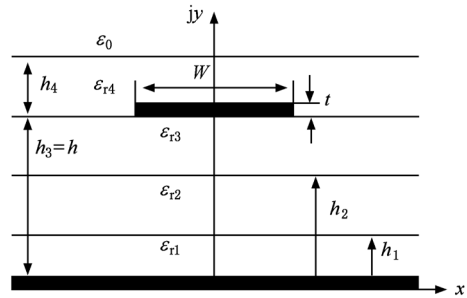


图6 补偿层模型示意图

补偿层模型的分析结果如图 7 和图 8 所示, 固定 $h_{\text{add}} = 15 \mu\text{m}$, $t = 5 \mu\text{m}$. n_m 随 ϵ_{r4} 的增大而明显增加, 而 Z_m 降低. 当 $\epsilon_{r4} > 2.3$ 时, $n_m > 1.52$, 此时已经可以满足微波与光波速率的匹配, 即可以达到 $n_m = n_{\text{eff}}$. 电极宽度 W 对 n_m 的影响不大; 但是对于特征阻抗, W 每增加 $1 \mu\text{m}$, Z_m 降低 1Ω 左右. 上包层材料 UV11-3 的微波相对介电常数为 2.5, 若选择上包层材料作为补偿层, 即等同于将电极嵌入上包层中, 即 $\epsilon_{r4} = 2.5$. 当 $t = 5 \mu\text{m}$ 时 n_m 和 Z_m 随补偿层厚度 h_{add} 变化情况如图 8 所示. 同样, n_m 随 h_{add} 的增

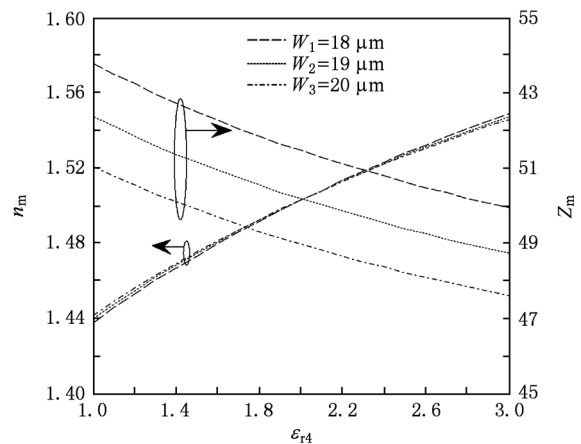


图7 微波的有效折射率和特征阻抗随补偿层的相对介电常数的变化

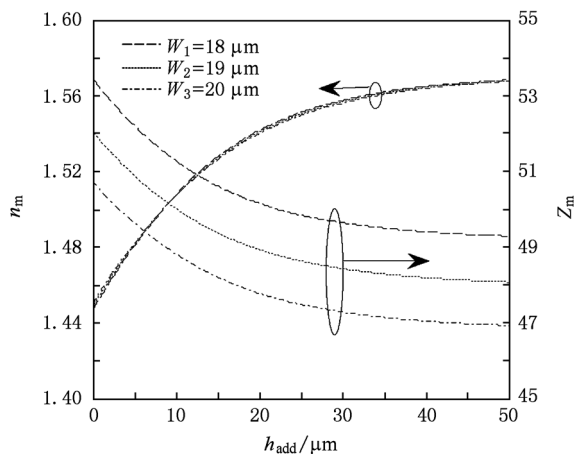


图8 微波的有效折射率和特征阻抗随补偿层厚度的变化

大而增加,但增加趋势趋于平缓,当 h_{add} 足够大时, n_m 基本不随 h_{add} 变化; Z_m 相应的值较小,在 $h_{\text{add}} > 35$ 时,变化幅度很小. 图7和图8描述的变化趋势正好有助于实现速率和阻抗的同时匹配,因此选择合适的聚合物材料能在简单的微带线结构下实现目标. 通过对 Wheeler's Conforming Mapping 扩展变换的研究,对传统调制器模型的改进分析,表1例举了三

组微带电极结构参数,分别在不同的电极厚度下同时达到了速率和阻抗匹配.

表1 速率匹配和阻抗匹配的结构参数

组	$t/\mu\text{m}$	$W/\mu\text{m}$	$h_{\text{add}}/\mu\text{m}$	n_m	n_{eff}	Z_m/Ω
1	0.5	25.0	14.9	1.527	1.527	50.03
2	1.0	24.5	15.0	1.527	1.527	49.50
3	5.0	18.0	14.8	1.527	1.527	50.64

4. 结 论

本文对多层介质微带模型进行了研究,采用 Wheeler 扩展变换法得到了其特征参数与各层介质局部参数的表达式,计算过程简单快捷,可对任意层数的多层介质问题进行求解. 将该方法运用到单臂微带调制的 M-Z 型聚合物调制器中,分析了电极结构参数对微波介电常数和特征阻抗的变化情况,提出了一种速率补偿层模型,结果显示这种方法能有效的减小了光波和微波之间的速率差异,理论上实现了速率和阻抗的同时匹配.

[1] Dagli N 1999 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **47** 1151
 [2] Chen D, Fetterman H R 1997 *Appl. Phys. Lett.* **70** 3335
 [3] Xie H Y, Wang L, Zhao L J, Zhu H L, Wang Y 2007 *Chin. Phys.* **16** 1459
 [4] Gorman T, Haxha S, Ju J J 2009 *J. Lightw. Technol.* **27** 68
 [5] Koos C, Vorreau P, Vallaitis T 2009 *Nature Photonics* **3** 216
 [6] Brosi J M, Koos C, Andrian L C 2008 *Opt. Express* **16** 4177
 [7] Li B, Vemagiri J, Dinu R 2009 *J. Lightw. Technol.* **27** 606
 [8] Xie H Y, Jin D Y, He L J, Zhang W, Wang L, Zhang W R, Wang Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4558 (in Chinese) [谢红云、金冬月、何莉剑、张蔚、王路、张万荣、王圩 2008 物理学报 **57** 4558]
 [9] Rod C, Steven K 1984 *IEEE J. Quantum Elect.* **20** 301
 [10] Li S S, 1993 *Acta Phys. Sin.* **42** 1020 (in Chinese) [李世忱 1993 物理学报 **42** 1020]
 [11] Chen G J, Xia Z F, Zhang Y W 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 1066 (in Chinese) [陈钢进、夏钟福、张冶文 1999 物理学报 **48** 1066]
 [12] Mark L, Howard E K, Christoph E 2002 *Science* **298** 1401
 [13] Shi Y Q, Lin W P, David J O 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 1
 [14] Yamashita E 1968 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **16** 529
 [15] Yamashita E, Atsuki K 1970 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **18** 238
 [16] Farrar A, Adams A T 1974 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **22** 889
 [17] Wheeler H A 1964 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **12** 280

Characteristic study of polymer electro-optic modulator based on extended wheeler's conforming mapping method*

Wen Yue[†] Zhang Xiao-Xia Huang Chun-Yang Shen Jie

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 641005, China)

(Received 15 November 2010; revised manuscript received 28 December 2010)

Abstract

An extended Wheeler's conforming mapping method is proposed to analyze the characteristic parameters of the multilayer based on the simple Wheeler's transformation. The explicit expression between the microwave characteristic parameter and the each layer parameter is obtained. Compared with the results obtained by the quasi-static finite element method (QS-FEM), our results show that the present approach can not only accurately evaluate the characteristic parameters of the multilayer but also have a great computational efficiency. Based on this method, a modified structure of the typical electro-optic modulator is given. The velocity matching and the impedance matching can be achieved simultaneously by adding a compensation layer.

Keywords: extended Wheeler's transformation, microwave electrode, characteristic parameter, microwave effective index

PACS: 42.82.-m

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program for Advanced Materials of China (Grant No. 2009AA03Z413).

[†] E-mail: wy0856@yahoo.com.cn