

低功耗聚合物波导可调耦合器的优化设计

宋红妍^{1,3} 韩秀友^{1,3} 邹品^{1,3} 王凌华^{1,3} 谷一英^{1,3} 王锦艳^{2,3} 蹇锡高^{2,3} 赵明山^{1,3}

¹ 大连理工大学 物理与光电工程学院, 辽宁 大连 116024
² 大连理工大学 化工学院, 辽宁 大连 116024
³ 大连理工大学 光子技术研究中心, 辽宁 大连 116024

摘要 提出并研究了一种带隔热槽的马赫-曾德尔干涉结构聚合物波导可调耦合器。仿真分析了热光电极作用下有、无隔热槽的耦合器波导温度分布,表明设置隔热槽可以降低热光调谐所需的功耗。研究了铝电极作用下不同上包层厚度对光传输损耗的影响,确定了上包层厚度。根据隔热槽与电极之间距离对热光调谐功耗的影响,结合隔热槽对导波光模式的影响及波导制备工艺,确定了隔热槽的位置。最终设计的带隔热槽聚合物波导可调耦合器实现1~0的分束比所需功耗为2.20 mW,是无隔热槽的47.4%。

关键词 光学器件;聚合物波导;热光效应;可调耦合器;隔热槽

中图分类号 TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0723003

Optimal Design of Low Power Tunable Coupler Based on Polymer Waveguide

Song Hongyan^{1,3} Han Xiuyou^{1,3} Zou Pin^{1,3} Wang Linghua^{1,3}
Gu Yiyi^{1,3} Wang Jinyan^{2,3} Jian Xigao^{2,3} Zhao Mingshan^{1,3}

¹ School of Physics and Optoelectronic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

² School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

³ Photonics Research Center, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

Abstract A tunable polymer waveguide coupler based on Mach-Zehnder interferometer (MZI) with thermal isolation trenches (TITs) is proposed and analyzed. The temperature distribution in the cross section of polymer waveguides with and without TITs is simulated, which illustrates that the TITs can reduce the power consumption efficiently. The proper thickness of up-cladding waveguide is chosen through investigating the propagation loss of guided modes under aluminium electrode. According to the power consumption influenced by the distance between the TIT and the metal electrode, the optical loss induced by the mode mismatch of the waveguides with and without TITs, and precision of the fabrication craft, the position of TITs is determined. To realize the splitting ratio from 1 to 0, the power of the designed tunable polymer waveguide coupler with TITs is 2.20 mW, which is only 47.4% of the coupler's power without TITs.

Key words optical devices; polymer waveguide; thermo-optical effect; tunable coupler; thermal isolation trenches

OCIS codes 130.3120; 130.5460; 130.2790

收稿日期: 2012-01-04; **收到修改稿日期**: 2012-02-02

基金项目: 国家自然科学基金(60807015,60577014,61077015)、教育部高校博士点基金(200801411037)、辽宁省自然科学基金(20102020)和中央高校基本科研业务费专项项目(DUT11LK42,DUT852006)资助课题。

作者简介: 宋红妍(1984—),女,硕士研究生,主要从事集成光子学器件设计、制备及应用等方面的研究。

E-mail: goodluckshy@163.com

导师简介: 韩秀友(1977—),男,博士,副教授,主要从事集成光电子器件、聚合物光子学和微波光子学等方面的研究。

E-mail: xyhan@dlut.edu.cn (通信联系人)

1 引言

有机聚合物是一类极具性能优势和应用前景的光子学材料^[1,2],它具有成本低、成膜性好、可与多种不同衬底材料匹配、易集成等优点,同时它提供了一个理想的平台,通过分子结构设计或选择掺杂等手段可获得具有新型功能(如高非线性、高增益等)的光子学材料。波导器件制备方面既可以采用与半导体加工相兼容的光刻-刻蚀[反应离子刻蚀(RIE)或电感耦合等离子体(ICP)刻蚀]工艺^[3],也可采用能够充分发挥聚合物良好成膜与塑性成型特性的微纳米压印工艺^[4,5]。聚合物光子学材料及其功能器件在光电子、光互联和光传感等领域呈现出广阔的应用前景,相关研究受到人们的极大关注,并成为国际上光子学材料与集成光子学功能器件研究与开发的最活跃的前沿领域之一。

与无机波导材料相比,聚合物材料的大热光系数($-1 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C} \sim -4.2 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$)使其在基于热光效应的集成波导功能器件方面具有独特的优势^[6],基于聚合物材料的波导热光开关^[7,8]、可调谐光衰减器^[9]和可调谐滤波器等^[10]相继有报道出现。随着波导结构的优化设计,热光调谐的功耗将进一步降低。

本文在课题组前期聚合物 PSQ-L 光波导材料与器件研究的基础上^[5,11,12],对应用于可调波导微环谐振器^[13]中的马赫-曾德尔干涉结构波导可调耦合器进行了优化设计,研究了在热光电极两侧设置隔热槽

(TITs)来降低分束比调谐功耗。采用任意多物理场直接耦合分析软件 Comsol Multiphysics 仿真分析了热光电极作用下有、无隔热槽时耦合器波导的温度变化分布,表明设置隔热槽可以降低热光调谐所需的功耗。根据波导传输理论,研究了电极作用下不同波导上包层厚度对光传输损耗的影响,确定了上包层厚度。通过分析隔热槽与电极之间距离对热光调谐功耗的影响,结合因隔热槽存在而产生的模式失配损耗及波导制备工艺,确定了隔热槽的位置。

2 可调波导耦合器结构

图 1 为带隔热槽的 2×2 可调耦合器示意图,图 1(a)为耦合器的俯视图,图 1(b)为调相区波导的横截面示意图。采用微纳米压印工艺制备光波导,波导结构为倒脊形,通过优化设计,选取脊宽 $w = 3 \mu\text{m}$,脊高 $h_1 = 2 \mu\text{m}$,平板波导层厚度 $h_2 = 0.6 \mu\text{m}$;电极宽度 $w_e = 10 \mu\text{m}$,高度 $h_e = 0.2 \mu\text{m}$,长度 $L_e = 2000 \mu\text{m}$;隔热槽对称地分布在马赫-曾德尔两臂两边,高度与波导高度相同,宽度由隔热槽与电极之间的距离(用 l 表示)和马赫-曾德尔干涉仪两臂之间的距离决定。波导材料选用聚合物 PSQ-L 系列^[11],芯层材料为 PSQ-LH,其折射率为 1.52;包层材料为 PSQ-LL,其折射率为 1.45,材料的导热系数 $k_p = 0.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ^[14],隔热槽中充满空气,空气的导热系数为 $k_0 = 0.0262 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ^[15]。

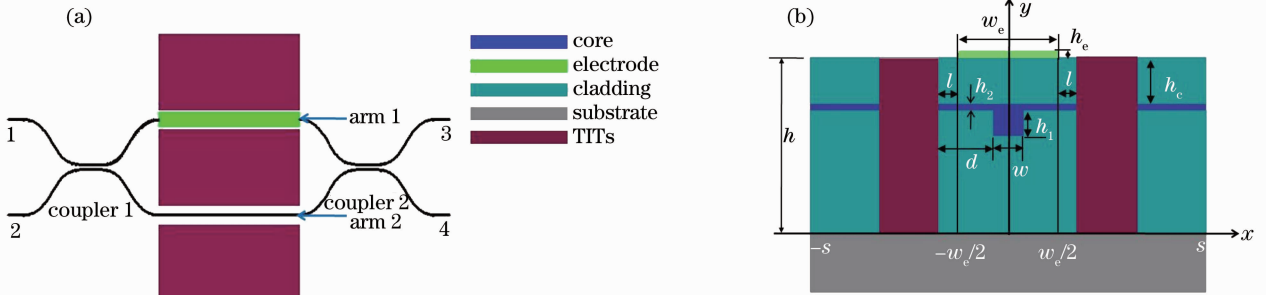


图 1 带有隔热槽的可调耦合器。(a)耦合器的俯视图;(b)有隔热槽的电极波导横截面

Fig. 1 Tunable coupler with TITs. (a) Top view of coupler; (b) cross-section of waveguide electrode with TITs

基于上述倒脊形波导结构构建的马赫-曾德尔结构 2×2 可调耦合器,经优化设计定向耦合区的两平行直波导长度取 $78.7 \mu\text{m}$,间距为 $1 \mu\text{m}$,以满足 3 dB 分束功能。臂 1 上的电极长度取 $2000 \mu\text{m}$,根据马赫-曾德尔干涉仪原理,该结构 2×2 耦合器的交叉强度耦合系数(端口 1→端口 4)为

$$\kappa = \cos^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right), \quad (1)$$

式中 $\Delta\varphi$ 为马赫-曾德尔结构两臂的相位差。在电极未加热时,光波从端口 1 输入,经过耦合区 1 分束后沿两臂传输,经耦合区 2 后,光波完全从端口 4 输出。如果电极开始工作而使光波发生大小为 π 的相移,则端口 4 的输出光强为 0,光波完全从端口 3 输出。因此,为了实现耦合系数从 $1 \sim 0$ 的变化功能,则两臂的相位差应在 $0 \sim \pi$ 范围内可调,即热光电极

作用下臂 1 所获得的最大相移量为 π 时可以实现耦合系数的一个周期变化。红色部分为隔热槽,对称地分布在马赫-曾德尔臂的两边,电极两边的隔热槽主要是为了阻断热量的传输,同时可以降低对另外一臂波导中传输光波的热串扰。隔热槽的存在会改变波导的有效折射率,从而改变光相位,因此在臂 2 侧面设置隔热槽,使臂 1 和臂 2 的结构保持对称,消除隔热槽对相位的影响。

3 有、无隔热槽的温度变化对比

基于有机聚合物热光器件的二维热学模型^[16],采用任意多物理场直接耦合分析软件 Comsol Multiphysics 模拟带隔热槽与不带隔热槽的波导的温度变化分布,以确定有隔热槽与无隔热槽相比是否具有优势。

无隔热槽的波导横截面尺寸与有隔热槽的一样,只是无隔热槽。取电极单位面积功耗为 200 mW/mm^2 ,分别计算无隔热槽和有隔热槽(隔热槽与电极的距离 l 为 $2 \mu\text{m}$)时的温度变化分布,如图 2 和图 3 所示, xy 平面为波导的横截面, ΔT 轴为温度变化量。

当波导两边加隔热槽时,对比图 3 与图 2 可以看出,在相同功耗下,波导加隔热槽的温度变化与波导无隔热槽时的温度变化相比要大得多。由于影响光相位的主要是波导芯层及附近的温度变化,故选取矩形芯层中心处的温度变化量进行比较,数据整理列于表 1。可以看出对于波导芯层,无隔热槽波导温度变化量仅是有隔热槽的 59.5%。

表 1 电极单位面积功耗下的波导温度变化对比

Table 1 Comparison of waveguide temperature changes under the unit electrode power

	Max of temperature changes /K	Temperature changes at core /K
Without TITs	7.471	3.488
With TITs($l=2 \mu\text{m}$)	10.406	5.865
Temperature change ratio of electrode without TITs to with TITs /%	71.8	59.5

根据相位变化量 $\Delta\phi$ 公式

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\partial n}{\partial t} \right) \Delta TL_e, \quad (2)$$

式中 $\partial n/\partial t$ 为材料的热光系数,对于 PSQ-L 材料 $\partial n/\partial t = -1.21 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, L_e 为电极长度, ΔT 为温度变化量。这里未考虑热膨胀对波导有效折射率的影响,这是因为波导的芯层和包层都是在衬底上生成,而衬底通常很厚,当温度变化时,整个波导的热膨胀主要是由衬底的热膨胀引起,因此整个波导

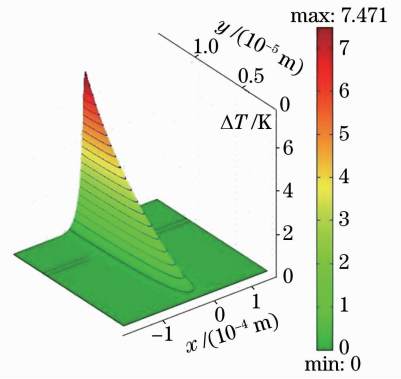


图 2 电极单位面积功耗(200 mW/mm^2)下无隔热槽波导的温度变化分布

Fig. 2 Temperature distribution of the waveguide without TITs under the unit electrode power (200 mW/mm^2)

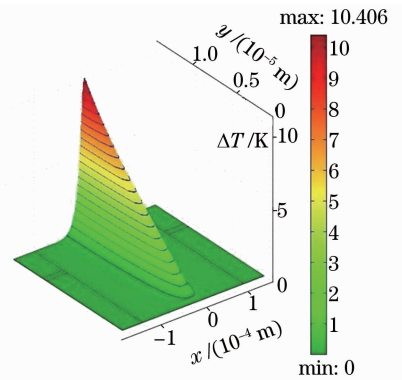


图 3 电极单位面积功耗(200 mW/mm^2)下,隔热槽与电极相距 $2 \mu\text{m}$ 时的温度变化分布

Fig. 3 Temperature distribution with the separation between TITs and electrode is $2 \mu\text{m}$ under the unit electrode power (200 mW/mm^2)

的热膨胀特性依赖于衬底材料的热膨胀系数^[17]。本文选择硅材料作为波导的衬底,其膨胀系数为 $2.63 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ^[17],而 PSQ-L 材料的热光系数约 -10^{-4} K^{-1} ,其绝对值远远大于硅材料的热膨胀系数,因此热膨胀效应对相位的影响是可以忽略的。

由(2)式可知,温度变化越大,相位变化越大,因此要达到相同的目标相移,有隔热槽波导所需功耗与无隔热槽波导所需功耗相比要小。

4 上包层厚度的选取

聚合物热光调制器件一般由聚合物波导和加热电极组成,电极材料通常选用铝、钛、铬和铜等金属^[18,19]。金属电极在通入电流时将产生热量,利用聚合物波导的热光效应可实现对波导中传输光波相位的改变。从这方面考虑,聚合物波导的上包层应越薄越好,以利于在较低的电极功耗下获得对光波较大的相位调制^[20]。然而,金属材料的介电常数为复数,其虚部将会造成进入金属电极中传输光波的能量损失,从这方面考虑,聚合物波导上包层应具有足够的厚度,以避免波导中的光波进入到金属电极中^[21]。因此有必要对聚合物波导上包层厚度对光波传输特性的影响进行研究,以达到聚合物波导热光器件性能的优化。

为了选取适合的上包层厚度,必须知道在不同上包层厚度下,金属电极引起的光波能量损耗情况。为此,选取铝电极来分析不同上包层厚度对波导中光波传输损耗的影响。采用 Rsoft 公司开发的 BeamPROP 软件对金属层引起的波导中传输光波的损耗特性进行仿真分析。

波导中传输光波波长为 $1.55 \mu\text{m}$,图 4 是铝(复折射率为 $1.4 + 16i$,电阻率为 $2.709 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$)^[15]作为电极的情况下,TE模式和TM模式光波经历

表 2 铝电极作用下不同上包层厚度波导的传输损耗

Table 2 Propagation loss of guided modes under aluminium electrodes with different up-cladding thicknesses

Up-cladding thickness / μm	Mode TE		Mode TM	
	Output intensity	Loss / (dB/cm)	Output intensity	Loss / (dB/cm)
1.0	0.94601	1.20521	0.31613	25.00671
1.5	0.98756	0.27183	0.78678	5.20733
2.0	0.99691	0.06720	0.94848	1.14859
2.5	0.99898	0.02216	0.98785	0.26545
3.0	0.99948	0.01129	0.99678	0.07003
3.5	0.99961	0.00847	0.99881	0.02586
4.0	0.99966	0.00738	0.99942	0.01259
4.5	0.99969	0.00677	0.99951	0.01133

5 隔热槽的位置对功耗的影响

由前边的描述可以知道,波导两侧有隔热槽的可调耦合器与无隔热槽的耦合器相比在功耗上具有较大优势,但隔热槽的位置对功耗的影响程度需要进一步确定。本部分将分析不同隔热槽与电极之间的距离 l 下相位变化 π 所需要的功耗,以确定隔热槽的位置对功耗的影响。

本文选用 Comsol Multiphysics、Matlab 和

2000 μm 长度波导后归一化输出光强大小随上包层厚度变化的关系曲线。从图 4 可以看出,在上包层厚度较薄时,输出功率随上包层厚度的减小呈指数形式衰减, TM 模式的光波损耗大于 TE 模式的光波损耗,这是由于 TM 模式的电场垂直于上包层表面,更易进入金属电极中,从而更多地被金属层吸收。

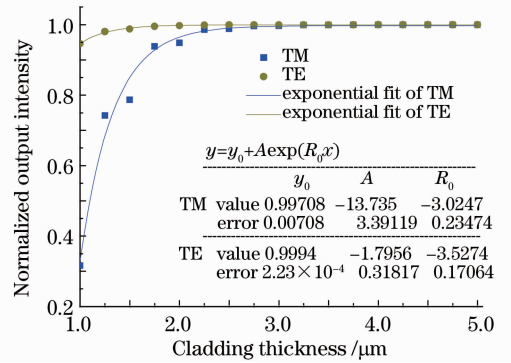


图 4 铝电极输出功率随上包层厚度变化的关系曲线
Fig. 4 Output power versus up-cladding thickness under aluminium electrode

为了更清晰地看出上包层厚度对波导中光波传输损耗的影响,将图 4 中铝电极的数据进行整理汇总,列于表 2。以 TE 模式和 TM 模式的单位长度损耗皆小于 0.015 dB/cm 为标准,从表 2 可以看出,对于铝电极,波导上包层的厚度应大于 $4 \mu\text{m}$ 。

Rsoft 软件结合计算。分析过程的步骤如下:

1) 利用 Comsol Multiphysics 软件计算折射率变化分布

根据有机聚合物热光器件的二维模型^[16],计算波导的温度变化分布。为了采用 Comsol Multiphysics 软件直接计算出折射率变化分布,需要对有机聚合物热光器件的二维模型进行变换。二维拉普拉斯程即稳态场下的温度场方程及边界条件为^[16]

$$k \left(\frac{\partial^2 \Delta T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial y^2} \right) = 0, \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \Delta T}{\partial x} \Big|_{x=\pm s} = 0, & 0 \leq y \leq h \\ \Delta T \Big|_{y=0} = 0, & -s \leq x \leq s \\ k \frac{\partial \Delta T}{\partial y} \Big|_{y=h} = \begin{cases} -\alpha_0 \Delta T, & \frac{\omega_c}{2} < |x| \leq s \\ g - \alpha_0 \Delta T, & |x| \leq \frac{\omega_c}{2} \end{cases}, \end{cases} \quad (4)$$

式中 $g = P/\omega_c L_e$, k 为材料的导热系数, P 为电极热功率, h 为波导总厚度, $2s$ 为波导总宽度, α_0 为对流换热系数, 对于无扰动的空气 $\alpha_0 = 5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ [16]。

折射率变化与温度变化的关系为

$$\Delta n = \frac{\partial n}{\partial t} \Delta T. \quad (5)$$

将(5)式代入(3)、(4)式进行变换, 得到

$$\frac{k}{\partial n / \partial t} \left(\frac{\partial^2 \Delta n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta n}{\partial y^2} \right) = 0. \quad (6)$$

相应的边界条件变换为

$$\begin{cases} \frac{\partial \Delta n}{\partial x} \Big|_{x=\pm s} = 0, & 0 \leq y \leq h \\ \Delta n \Big|_{y=0} = 0, & -s \leq x \leq s \\ \frac{k}{\partial n / \partial t} \frac{\partial \Delta n}{\partial y} \Big|_{y=h} = \begin{cases} -\frac{\alpha_0}{\partial n / \partial t} \Delta n, & \frac{\omega_c}{2} < |x| \leq s \\ g - \frac{\alpha_0}{\partial n / \partial t} \Delta n, & |x| \leq \frac{\omega_c}{2} \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

利用边界条件(7)式, 在 Comsol Multiphysics 软件中建立模型, 计算出电极加热引起的折射率变化分布。计算过程中波导横截面划分正方形网格间隔为 $0.1 \mu\text{m}$ 。

2) 采用 Matlab 处理折射率数据

由于 Rsoft 软件中对波导导入折射率时, 波导的折射率由导入数据决定, 而从 Comsol Multiphysics 导出的数据只是波导折射率的变化量, 因此需在芯层区域加上原来波导折射率。用 Matlab 软件从 Comsol Multiphysics 软件中提取数据并进行处理, 最后将数据导出存为 Rsoft 软件的折射率文件。

3) 将数据导入 Rsoft 进行计算

将折射率数据导入 Rsoft 进行计算获得分束比从 1 变化到 0 所需的电极功耗。根据前面的分析, 耦合器分束比从 1 变化到 0, 电极引起马赫-曾德尔干涉仪加热臂的相位改变量为 π 。选取铝作为电极材料, 上包层厚度选取 $4 \mu\text{m}$, 按上述步骤, 计算出不同 l 下, 波导两侧带隔热槽的耦合器相位变化 π 所

需的功耗, 如表 3 所示。

表 3 不同 l 时, 相位改变 π 所需的功耗

Table 3 Electrode power for phase change of π under different l

Distance between TITs and electrode $l / \mu\text{m}$	Electrode power of phase change π / mW	Electrode power ratio of electrode with TITs to without TITs / %
0	2.20	47.4
1	2.40	51.7
2	2.70	58.2
5	3.40	73.3
10	4.00	86.2
15	4.60	99.1
∞ (Equivalent to without TITs)	4.64	

由表 3 可以看出, 波导有隔热槽时, 隔热槽与电极的距离越小, 相位改变 π 所需的功耗越小, 隔热槽对功耗的影响越大。隔热槽与电极的距离为 $0 \mu\text{m}$ 时(隔热槽与波导芯层边缘的距离 d 为 $3.5 \mu\text{m}$), 相位变化 π 所需的功耗最小, 为 2.20 mW , 仅是波导两侧无隔热槽时相位变化 π 所需功耗的 47.4% ; 当隔热槽与电极的距离为 $15 \mu\text{m}$ 时, 相位变化 π 所需的功耗为 4.60 mW , 是无隔热槽的 99.1% , 基本接近无隔热槽时的功耗。因此隔热槽与电极之间的距离大于 $15 \mu\text{m}$ 时, 隔热槽对功耗几乎没有影响, 无法起到效果。

根据上述结论, 从功耗上考虑, 隔热槽与电极之间的距离应越小越好, 但隔热槽的存在会改变波导的模式分布, 从而产生模式失配损耗。如图 5 所示, 对比无隔热槽[图 5(b)]和有隔热槽[图 5(c), 隔热槽与波导芯层边缘距离 d 为零]的模式分布, 可以看出两波导对接时将产生较大的模式失配损耗。因此需要分析隔热槽与波导芯层边缘距离 d 对模式失配损耗的影响。如图 6 所示, 横坐标为隔热槽与波导芯层边缘距离 d [如图 1(b)所示], 纵坐标为归一化输出功率, 由该图可以看出, d 越小, 输出功率越小, 即模式失配损耗越大。当 $d = 1.5 \mu\text{m}$ 时, 归一化输出功率为 0.99187 , 即模式失配损耗不到 1% ; 当 $d \geq 2.0 \mu\text{m}$ 时, 模式失配损耗不到 0.5% 。

对于本文分析的电极波导结构(电极宽度 $10 \mu\text{m}$ 、波导脊宽 $3 \mu\text{m}$), 当隔热槽与电极之间的距离 l 为 $0 \mu\text{m}$, 隔热槽与波导芯层边缘的距离 d 为 $3.5 \mu\text{m}$, 此时由于模式失配产生的损耗为 0.25% , 可以忽略; 隔热槽可采用反应离子刻蚀工艺来制

备^[21],光刻对准工艺可使隔热槽与电极的距离 l 为 $0\ \mu\text{m}$;因此,综合考虑隔热槽对电极功耗、导波模式产生的影响及波导制备工艺,选择加隔热槽且隔热槽与电极的距离 l 为 $0\ \mu\text{m}$,此时优化得到的耦合器功耗可低至 $2.20\ \text{mW}$,为无隔热槽时电极功耗的 47.4% 。

如果电极宽度变窄,需要合理选择隔热槽与波导芯层边缘的距离 d ,以保证模式失配损耗小于所能允许的程度,比如模式失配损耗小于 0.5% ,则隔热槽与波导芯层边缘的距离 d 应大于 $2\ \mu\text{m}$ 。

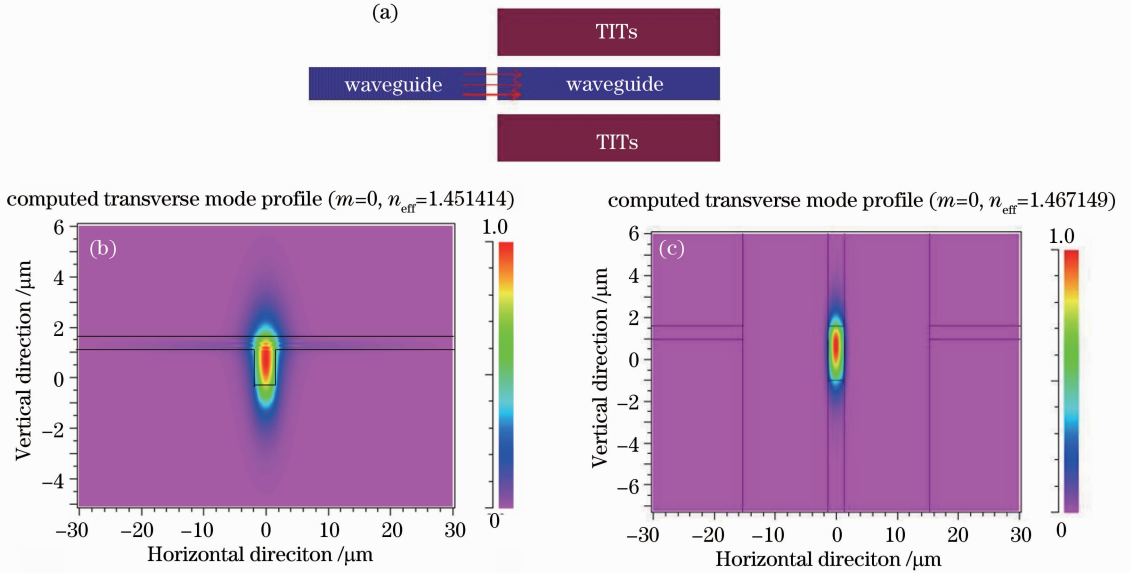


图 5 隔热槽对波导模场分布的影响。(a)无隔热槽波导到有隔热槽波导的俯视图,波导模场分布;
(b)无隔热槽;(c)有隔热槽

Fig. 5 Influence of TITs to the waveguide mode fields. (a) Top view of waveguide without TITs to waveguide with TITs, waveguide mode fields; (b)without TITs; (c) with TITs

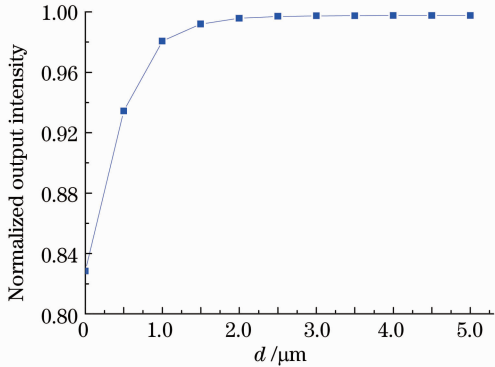


图 6 输出功率随隔热槽与波导芯层边缘的距离 d 的变化关系曲线

Fig. 6 Output power versus the distance between TITs edge and waveguide core edge

5 结 论

对带有隔热槽的马赫-曾德尔干涉型聚合物热光可调耦合器进行了研究分析。利用 Comsol Multiphysics 软件仿真比较了耦合器波导在有、无隔热槽条件下的温度场分布,表明加隔热槽耦合器具有低功耗的优势;仿真分析了不同上包层厚度下

电极材料对导波光传输损耗的影响;计算了隔热槽与电极不同距离下相位变化 π 所需要的功耗,表明隔热槽与电极的距离越小,所需的电极功耗越小;综合考虑隔热槽与波导芯层边缘距离对导波模式产生的影响以及波导制备工艺,最终优化选择隔热槽与电极的距离为 0 (隔热槽与波导芯层边缘的距离 d 为 $3.5\ \mu\text{m}$),此时实现耦合系数从 1 变到 0 所需的电极功耗可低至 $2.20\ \text{mW}$,为无隔热槽的 47.4% 。研究工作对聚合物热光调谐器件的设计与制备具有良好的参考价值。

参 考 文 献

- H. Ma, A. K.-Y. Jen, L. R. Dalton. Polymer-based optical waveguides-materials, processing and devices [J]. *Advanced Materials*, 2002, **14**(19): 1339~1365
- L. Eldada. Advances in polymer-based dynamic photonic components, modules, and subsystems[C]. *SPIE*, 2006, **6351**: 63510Y
- Yun Binfeng, Hu Guohua, Cui Yiping. Polymer micro-ring resonator filter with high quality factor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1013002
- 恽斌峰, 胡国华, 崔一平. 高品质因子聚合物波导微环谐振腔滤波器[J]. *光学学报*, 2011, **31**(10): 1013002
- L. J. Guo. Recent progress in nanoimprint technology and its

- applications[J]. *J. Phys. D*, 2004, **37**(11): R123~R141
- 5 J. Teng, S. Scheerlinck, H. Zhang *et al.*. A PSQ-L polymer microring resonator fabricated by a simple UV-based soft-lithography process[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(18): 1323~1325
- 6 Z. Zhang, P. Zhao, P. Lin *et al.*. Thermo-optic coefficients of polymers for optical waveguide applications[J]. *Polymer*, 2006, **47**(14): 4893~4896
- 7 F. Wang, J. Yang, L. Chen *et al.*. Optical switch based on multimode interference coupler [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(2): 421~423
- 8 Wang Wei, Sun Xiaoqiang, Wang Xibin *et al.*. Low power consumption polymer thermo-optic switch with mach-zehnder interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(4): 610~613
王 微, 孙小强, 王希斌 等. 低功耗聚合物 Mach-Zehnder 热光开关[J]. *光子学报*, 2010, **39**(4): 610~613
- 9 Young-Tak Han, Jang-Uk Shin, Sang-Ho Park *et al.*. 10 channel polymer variable optical attenuator array for power monitoring and equalization in integrated PLC ROADM module [C]. International Conference on Photonics in Switching, Sapporo, Japan, 2008. 1~2
- 10 J. Park, T. Lee, D. Lee *et al.*. Widely tunable coupled-ring-reflector filter based on planar polymer waveguide[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(12): 988~990
- 11 Hongbo Zhang, Jinyan Wang, Linke Li *et al.*. Synthesis of liquid polysilsequioxane resins and properties of cured films[J]. *Thin Solid Films*, 2008, **517**(2): 857~862
- 12 Xiyou Han, Jianing Zhang, Linghua Wang *et al.*. Quasi single sideband radio over fiber transmission with a polymer-based waveguide microring resonator[J]. *Opt. Eng.*, 2011, **50**(12): 124601
- 13 Zhang Jianing, HanXiyou, Song Hongyan *et al.*. Study on time delay characteristics of integrated waveguide microring resonator with tunable coupler[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2098~2103
- 张佳宁, 韩秀友, 宋红妍 等. 可调耦合器结构集成波导微环谐振腔延时特性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2098~2103
- 14 Lei Wei. Study on the Heater of Polymeric Thermo-Optical Switch [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004. 9
雷 伟. 聚合物热光开关电极研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004. 9
- 15 David R. Lide. CRC Handbook of Chemistry and Physics[M]. NewYork: CRC Press, 2002. 1405~1406, 1491~1511
- 16 Yang Jianyi, Jiang Xiaoqing, Yang Fanghui *et al.*. Thermal model of thermo-optical polymer devices [J]. *Optoelectronics • Laser*, 2000, **11**(4): 249~252
杨建义, 江晓清, 杨方辉 等. 有机聚合物热光器件的热学模型 [J]. *光电子·激光*, 2000, **11**(4): 249~252
- 17 Y. Kokubun, N. Funato, M. Takizawa. Athermal waveguides for temperature-independent lightwave devices [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(11): 1297~1300
- 18 Xi Yingxue, Niu Xiaoling. Research of polymeric optoelectronic devices based on the thermo-optic effect[J]. *J. Xi'an University of Arts & Science (Nat. Sci. Ed.)*, 2005, **8**(3): 67~71
惠迎雪, 牛小玲. 有机聚合物热光效应光电器件研究进展[J]. *西安文理学院学报*, 2005, **8**(3): 67~71
- 19 Ma Chunsheng, Cao Jie, Liu Shiyong. Mode absorption loss in metal-clad five-layer optical waveguides [J]. *Chinese J. Semiconductors*, 1993, **14**(5): 265~269
马春生, 曹 杰, 刘式塘. 金属包层五层介质光波导的模吸收损耗[J]. *半导体学报*, 1993, **14**(5): 265~269
- 20 Cao Zhuangqi. Guided Wave Optics[M]. Beijing: Science Press, 2007. 154~157
曹庄琪. 导波光学[M]. 北京: 科学出版社, 2007. 154~157
- 21 B. Howley, X. Wang, R. T. Chen *et al.*. Experimental evaluation of curved polymer waveguides with air trenches and offsets[J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, **100**(2): 023114

栏目编辑：韩 峰