

文章编号: 0253-2239(2005)06-816-5

热光效应下的全内反射光束展宽规律以及应用^{*}

余 辉 江晓清^{**} 杨建义 李锡华 王明华

(浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027)

摘要: 以热光型器件的热学模型和温度场解析表达式为基础, 运用射线法, 通过计算位于芯区不同子午面内的光线反射轨迹, 对热光效应下光束经全内反射后展宽的原因和规律进行了分析, 并且给出了具体光束展宽值的理论计算方法; 设计了高反射率的全内反射型有机聚合物热光开关。在设计中应用所提出的规律, 理论上计算出了具体的展宽波导宽度、芯区的掩埋深度、扩大的反射区宽度等结构参量。软件的模拟结果表明, 该结构在反射态和直通态时的效率分别为 82.6% 和 84.4%, 串扰均大于 30 dB, 并且对这些结构参量的模拟优化结果与理论计算结果基本一致。

关键词: 集成光学; 光开关; 全内反射; 光束展宽

中图分类号: TN256 文献标识码: A

Beam Expansion Law and Its Application in Total Internal Reflection Induced by Thermo-Optic Effect

Yu Hui Jiang Xiaoqing Yang Jianyi Li Xihua Wang Minghua

(Department of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: Based on the thermal model of thermo-optic device and analytical expression of temperature distribution, by employing the ray optics, the beam expansion cause and law in thermo-optic-effect-induced total internal reflection (TIR) are analyzed by calculating the ray reflection trace in different meridian plane of the core, and a theoretical method to calculate the specific expanding value of beamwidth is given. A 2×2 polymer thermo-optic switch with high reflection coefficient is designed as an illustration of the law. Utilizing the law in authors' design, the structure parameters of expansion waveguide width, buried depth of the core, and enlarged reflection area width are calculated. Simulation results show that the structure exhibits a reflection coefficient of 82.6% at reflecting state, a cross coefficient of 84.4% at cross state, the cross talks are better than 30 dB. The simulation optimized result of these structure parameters agrees with theoretical calculation.

Key words: integrated optics; optical switch; total internal reflection; beam expansion

1 引 言

采用全内反射(TIR)结构的数字型光开关, 由于其具有器件尺寸小, 偏振无关, 易与半导体有源器件单片集成, 有较强的工艺兼容性等优点, 近年来发展很快。在这类结构中, 最早利用的是电光效应^[1], 为了产生较大的折射率变化, 目前通常利用的是半导体材料中载流子注入引起的等离子效应, 或者量子阱中的量子限制斯塔克(Stark)效应, 以及最近应用比较多

的有机聚合物的热光及电光等效效应^[2~4]。由于简单的 X 交叉或 Y 分叉结构的全内反射(TIR)光开关消光比小, 损耗大, 无法实现高性能的开关功能, 因此必须对开关结构进行改进以提高性能。在种种改进的方法中, 扩展反射区的波导宽度可有效提高开关性能, 因而在实际设计中得到了应用^[2]。有关文献对此进行了分析, 认为在反射态下, 扩展反射区的宽度可以增大波导的有效折射率, 即增大了反射区的有效折

^{*} 国家自然科学基金(60177012, 60477018)和浙江省重点科技计划(G20030190)资助课题。

作者简介: 余 辉(1981~), 男, 博士研究生, 主要从事集成光学和光电子器件研究。

^{**} 通信联系人。E-mail: iseejq@zju.edu.cn

收稿日期: 2004-04-20; 收到修改稿日期: 2004-11-22

射率差,从而提高反射率^[5];而在直通态下,展宽可以增大光束的腰斑尺寸,从而减小衍射^[1]。但是在这些分析中采用的全内反射模型均假设反射区的折射率是不变的和阶跃的,而实际的反射区折射率则存在一定的分布,故而这些分析均只是定性的,并不全面,具体设计时只能依靠软件模拟来确定最佳展宽宽度等一系列的参量^[2]。

本文针对热光型的全内反射器件,以温度场分布的解析表达式为基础,对热光效应下光线的全内反射过程进行了分析,清晰地解释了光束在反射后展宽的原因,给出了波导展宽遵循的原则和计算方法。具体举例设计了高反射率的 X 结型 2×2 型热光开关,并

和软件模拟的结果进行验证,二者基本吻合。

2 光束在热光效应下的反射展宽分析

全内反射光开关的波导截面结构如图 1 (a) 所示,电极通电加热时,其下方聚合物材料折射率下降,光线即可在此区域发生全反射。器件以硅为衬底,芯区为沟道型结构,上下各有一限制层,电极在上限制层的上方。

按照图 1(a)中的坐标和参量,建立导热方程,确定边界条件,然后利用分离变量法,电极下方的温度场分布为^[6]

$$\theta = \frac{gw}{l(k+ah)}y + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos\left(\frac{n\pi}{l}x\right) \sinh\left(\frac{n\pi}{l}y\right), \quad (1)$$

$$C_n = \left\{ 1 - \frac{a \sinh[(n\pi/l)h]}{(\pi n k/l) \cosh[(n\pi/l)h] + a \sinh[(n\pi/l)h]} \right\} \frac{2gl \sin(n\pi w/l)}{kn^2 \pi^2 \cosh(n\pi h/l)}, \quad (2)$$

其中 $\theta = T - T_{\infty}$, T 为器件内部的热场中的温度, T_{∞} 为空气中无穷远处的温度, θ 于是可理解为由于电极温度的升高。 k 是材料的导热系数; a 为空气自由对流换热系数; g 是与电极结构相关的一个量,其表达式为

$$g = Q/(2wL), \quad (3)$$

Q 是电极的功率, $2w$ 即为电极的宽度, L 为电极的

长度。根据(1)式和(2)式做出温度场的等温线图如图 1(b)所示。

根据温度场分布的表达式和材料的热光系数,就可知道折射率变化的分布,从而可以对光线的反射情况进行分析。在分析中,我们假设所分析的光线在传输过程中限于子午平面内,并且在芯区中的光线传播方向与波导的轴向完全平行。

光线在热场中的反射如图 2 所示,阴影部分为电极,热场可认为集中在 $[-l, l]$ 区间,在此区间外部可认为温升为零^[6],光线的传输不受影响。当光线限于某一子午平面($x-z$ 平面)传输时,它的反射可以用下面公式来描述:

$$dz/dx = N_1 \cos \gamma / [N^2(x) - N_1^2 \cos^2 \gamma]^{1/2}, \quad (4)$$

$$N(x) = N_1 + \Delta N = N_1 + m\theta(x, y), \quad (5)$$

$$-l \leq x \leq l$$

(4) 式和(5)式中, γ 是入射角,即 X 结波导交叉角的

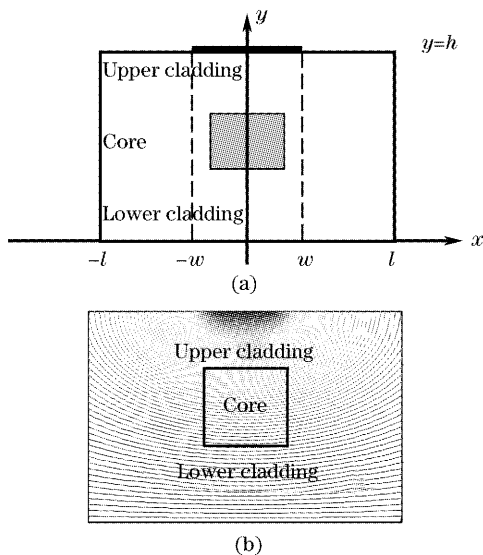


图 1 聚合物全内反射光开关示意图。(a) 截面图, (b) 温度分布的等温线图

Fig.1 Schematic diagram of total internal reflection polymeric optical switch. (a) Cross-section, (b) the contour map of temperature distribution

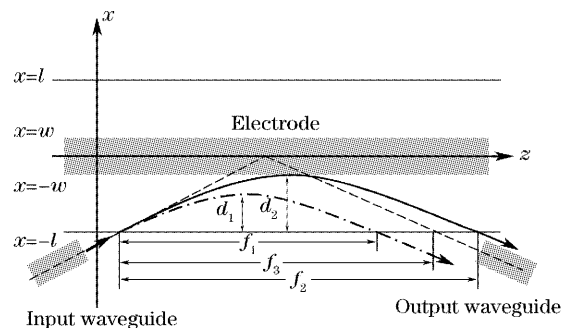


图 2 光线在热场中的反射

Fig.2 Reflection of light in the thermal field

一半。 N_1 是温升为零时有机聚合物材料的折射率， $N(x)$ 是热场内的折射率。 m 是材料的热光系数。由 (4) 式和 (5) 式很容易得到，在发生反射的焦散点处，有

$$N_1 + m \cdot \theta(x, y) = N_1 \cos \gamma, \quad (6)$$

(6) 式中只有 x 和 y 两个变量，由于假设光线是限定在确定的 $x-z$ 平面内传输，也就是说 y 确定后，便可从 (6) 式中求解出 x 。由 $\theta(x, y)$ 的表达式 (1) 可知，该方程是一个超越方程，无法直接给出解的表达式，但可以借助计算机数学工具求得数值解。图 3 即为焦散点的坐标 x_c 随 y 的变化规律 [参量按照 (11) 式中，以下相同]。根据焦散点的坐标 x_c ，入射光线在温升区的穿透深度 d 和光线出温升区时的偏移 f 分别为

$$d = l - |x_c|, \quad (7)$$

$$f = 2 \int_{-l}^{x_c} \frac{N_1 \cos \gamma}{[N^2(x) - N_1^2 \cos^2 \gamma]^{1/2}} dx, \quad (8)$$

x_c 、 d 和 f 确定之后，光线的反射轨迹就被确定了。需要说明的是，所求得的 x_c 、 d 和 f 都是在 y 确定的情况下求得的，可以看成是 y 的函数，即对于不同水平面上的光线，它们的穿透深度和偏移距离都是不同的，越靠近电极，温度越高 [如图 1(b) 所示]， d 和 f 也就越小，如图 2 所示，其中 f_1 和 f_2 分别为位于芯区的上表面和下表面的光线出温升区时的轴向偏移。由此可见，经过反射后光束确实展宽了。

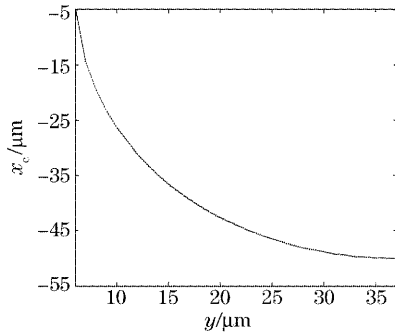


图 3 x_c 和 y 的关系

Fig. 3 The relationship between x_c and y

3 器件设计分析

X 结型 2×2 光开关在光通信和光交换中有比较广泛的用途，但是分析表明两根直波导互相交叉的简单 X 结是无法完成开关功能的，为此，在设计中需要将波导进行展宽，引入扩大的反射区，同时调整掩埋深度，通过这一系列的措施来提高性能 (如图 4 所示)。根据前面的理论分析，就可以对以上这些

措施进行定量计算，从而设计出高性能的 2×2 型热光开关。

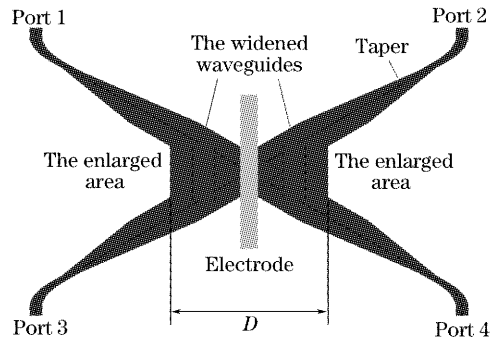


图 4 改进的全内反射热光开关结构

Fig. 4 The structure of improved total internal reflection thermal optic switch

3.1 波导展宽的计算

如前面分析的，反射后光束会展宽，为了使经过反射后展宽的光束都能进入芯区，芯区就必须向两侧展宽 (如图 4)，否则反射能量就不能有效进入反射波导。已知开关的入射端和出射端芯区轴线在 $x = -l$ 处的偏移为

$$f_3 = 2l / \tan \gamma, \quad (9)$$

那么芯区向两侧展宽的幅度应该分别为 (如图 2 所示)

$$p_1 = (f_3 - f_1) \sin \gamma, \quad p_2 = (f_2 - f_3) \sin \gamma, \quad (10)$$

在大多数情况下， $p_1 \neq p_2$ ，也就是说向两边的展宽是不相等的。展宽之后，对于光的入射端来说，由于光束的腰斑尺寸变大，光波的衍射角将变小，衍射损耗也减小，那么在直通态的效率也可以提高。

3.2 扩大的光反射区的计算

由图 2 可见，光线的反射是一个弧形，且不同层面的光线在温度升高区域的穿透深度也不同，因此有必要在反射位置引入一个扩大的反射区 (如图 4 所示)。其折射率与芯区相同。其设计遵循的原则是保证所有 $x-z$ 平面的光线的反射过程都能在该扩大的反射区完成。很显然，越靠近电极 (y 坐标越大)，温度越高，光线的穿透深度就越小，焦散点坐标 x_c 就越小 (如图 3 所示)。只要位于芯区上表面的光线能在此扩大的反射区完成反射，那么其它子午面的光线也肯定能在这个区域完成反射。所以扩大的反射区的宽度应为 $D = 2|x_{cmin}|$ ，如图 4 所示，其中 x_{cmin} 表示的是芯区上表面的焦散点坐标。

3.3 掩埋位置的计算

在软件模拟的过程中，我们注意到如果将芯区置于整个聚合物层的中间位置，即上下限制层的厚

度相等时,反射的效率并不高。

分析原因是因为在设计展览时,波导的出射端和入射端同时展览。对于入射端,在经过过渡区后,光场近高斯分布于整个展览区(如图 5)所示。而依据我们的展览设计原则,只能保证位于原波导区域内的光线(图 5 中的阴影部分)在反射后能被收集。对位于展览的波导中的光线(图 5 中的空白部分),其反射后由于光束的展览将无法全部进入出射端口,这就是损耗的来源。

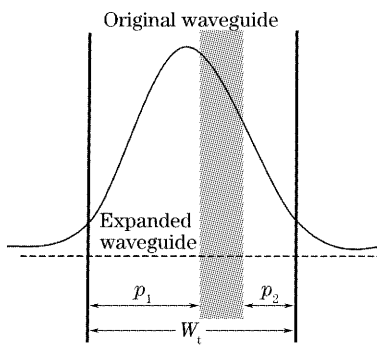


图 5 加宽的波导中的场分布

Fig. 5 Field distribution in the widened waveguide

为了减小上述原因的损耗,我们就必须使光能量尽可能多地集中在阴影区域中。由光场的近高斯分布可知,光能量主要集中在整个展览区的中间位置,这就要求阴影区域要尽可能位于整个展览区的中间,即要求 $p_1 = p_2$ 。为了做到这一点,可调整芯区在整个聚合物涂层中的位置。计算不同下限制层厚度下的 p_1 和 p_2 值,最后根据计算的结果,选择合适的芯区掩埋位置,便可以保证 $p_1 = p_2$ 。

4 具体例子的计算和软件模拟比较

为了便于同光纤耦合,芯区的尺寸为 $7 \mu\text{m} \times 7 \mu\text{m}$,其他结构参量如下:

$$\begin{cases} h = 37 \mu\text{m}, & w = 5 \mu\text{m}, \\ L = 3000 \mu\text{m}, & Q = 0.1 \text{ W}, \\ k = 0.177 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}), & l = 90 \mu\text{m}, \\ a = 5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}), \end{cases} \quad (11)$$

根据以上参量,选择波导的交叉角为 6° 。同时,按照上面提供的掩埋深度的设计原则,确定上下限制层厚度分别为 $19 \mu\text{m}$ 和 $11 \mu\text{m}$ 。根据这个数据,计算波导展览以及扩大的反射区宽度,得到 $p_1 \approx p_2 = 13.5 \mu\text{m}$, $D = 81 \mu\text{m}$ 这样原芯区基本处于整个展览区的中间。向两侧的展览值加上原芯区的宽度,就可以得到展览后总的波导宽度为 $W_t = 34 \mu\text{m}$,扩大的光反射区宽度为 $D = 81 \mu\text{m}$,最后的结构如图 4

所示。

我们利用 RSoft 公司的 BeamPROP 软件对上面确定的结构参量进行模拟,模拟的结果与理论计算值基本符合(模拟中,光线从端口 port 3 入射)。图 6 是反射态时对展览后波导宽度 W_t 进行扫描的结果。从扫描结果中可以看出,反射态时,反射效率刚开始上升,这是因为对于 port 1,展览越宽,可以收集的经反射后的光线越多。根据前面的计算,展览为 $34 \mu\text{m}$ 时,就能使 port 3 中原 $7 \mu\text{m} \times 7 \mu\text{m}$ 区域的光线反射后全被收集,反射效率基本到最大。从图中可见,展览大于 $34 \mu\text{m}$,进入曲线顶部的相对平坦区。而这之后反射效率又下降,经分析其原因是:对于 port 3,展览区过宽后,原 $7 \mu\text{m} \times 7 \mu\text{m}$ 区域内光能量所占比重减小了,这样能完全收集的光能量也减小了。顶部的平坦区可看成是这两种作用互相平衡的结果。

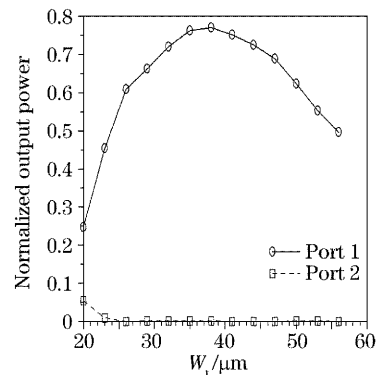


图 6 反射态下不同的 W_t 时的归一化输出

Fig. 6 Normalized output in different W_t on the reflection state

图 7 是反射态时对扩大的反射区宽度 D 进行扫描的结果:要使反射效率应达到最高,模拟的结果是 $92 \mu\text{m}$,略大于计算值。分析原因,主要是两点:

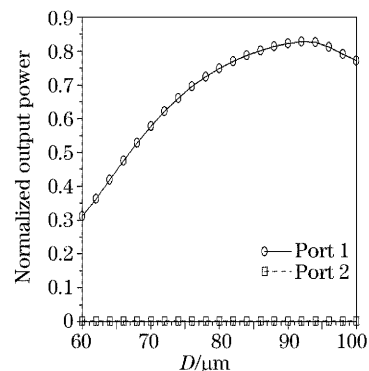


图 7 反射态下不同的 D 时的归一化输出

Fig. 7 Normalized output in different D on the reflection state

其一是因为用 Beam PORP 软件进行器件热光性能模拟时,对于其中的温度场,软件的设定计算步长是 $0.5 \mu\text{m} \times 0.5 \mu\text{m}$,在这种计算步长下,软件精度不够,模拟得到的温度偏高 10% 左右。计算温度偏高,自然也就导致穿透深度变小,模拟得到的扩大的光反射区最佳宽度自然就增大;其二是因为扩大的光反射区应包含整个光线的反射轨迹,而我们计算时仅是考虑了拐点,所以最优值应略大于计算值。我们还可以看出反射态效率下降的趋势,这很容易理解,该区域越大,光场在这个区域的衍射损耗也就

越大。

不同下限制层的厚度 T_h 和输入的电极功率下输出的情况如图 8 所示,从图 8 可见,在总厚度 $37 \mu\text{m}$ 的情况下,下限制层厚度为 $11 \mu\text{m}$ 时反射效率最高,这与理论计算结果完全符合;由于所有的计算参量都是根据电极功率 0.1 W 的情况下光线的反射情况计算得来的,改变电极功率,无论是加大还是减小,都将改变折射率的分布,从而改变光线反射的轨迹,导致反射功率减小,这一点也与图 8 中的模拟结果完全符合。

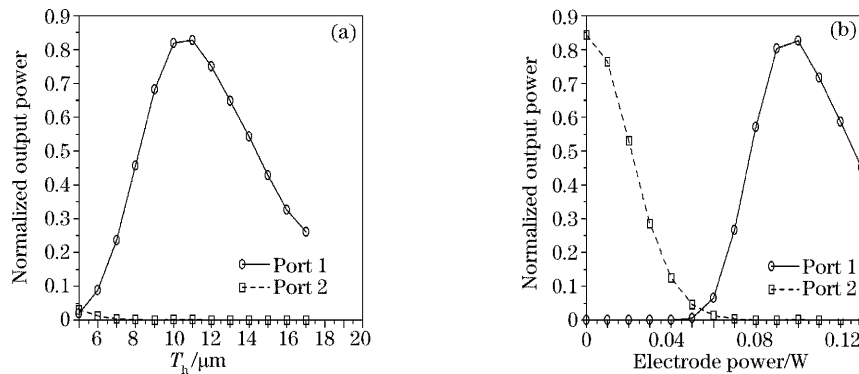


图 8 不同的 T_h (a)和不同的电极功率(b)下的归一化输出

Fig. 8 Normalized output in different T_h (a) and different electrode power (b)

综合考虑,选择扩大的光反射区的宽度为 $92 \mu\text{m}$,展宽后的波导宽度为 $40 \mu\text{m}$,芯区的尺寸为 $7 \mu\text{m} \times 7 \mu\text{m}$,上、下限制层厚度分别为 $19 \mu\text{m}$ 、 $11 \mu\text{m}$ 时模拟的开关器件在反射态和直通态下的反射效率和直通效率分别为 82.6%和 84.4%,串扰均大于 30 dB。

5 结 论

综上所述,我们提出的光束展宽规律及其理论计算同采用光束传输法软件模拟的结果吻合较好,我们以前报道的实验结果也证实了这种结构的光开关具有较高的消光比^[2],这些都充分证明了该分析方法以及波导设计的具体计算是合理的和有效的,并且该分析方法可以方便地应用到其它热光型器件的设计中去。

参 考 文 献

- 1 Sang K. Sheem. Total internal reflection integrated-optics switch: a theoretical evaluation[J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(22): 3679~3687
- 2 Yang Jianyi, Jiang Xiaoqing, Yang Fanghui *et al.*. 22 total-internal-reflection optical switches using thermo-optical using thermo-optic effect of polymer[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(2): 137~140 (in Chinese)
杨建义,江晓清,杨方辉等. 2×2 有机聚合物的全内反射型热光开关[J]. *中国激光*, 2003, **30**(2): 137~140
- 3 Yang Jianyi, Jiang Xiaoqing, Yang Fanghui *et al.*. Polymer thermo-optic switches with Y-branch[J]. *Acta Optical Sinica*, 2002, **22**(6): 735~738 (in Chinese)
杨建义,江晓清,杨方辉等. Y分支有机聚合物热光开关的研制[J]. *光学学报*, 2002, **22**(6): 735~738
- 4 Luo Duanbin, Yan Kun, She Weilong *et al.*. All optical switch with response time in millisecond magnitude based on azo-doped polymer films[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(1): 92~96 (in Chinese)
罗殿斌,严琨,余卫龙等. 毫秒有机聚合物薄膜全光开关[J]. *中国激光*, 2004, **31**(1): 92~96
- 5 Zhan Hengzheng, Jiang Xiaoqing, Chen Kejian *et al.*. Analysis of Y branch switch based on total internal reflection of multimode waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1187~1190 (in Chinese)
占恒正,江晓清,陈克坚等. 扩展多模波导全内反射型 Y 分叉开关的分析[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1187~1190
- 6 Yu Hui, Jiang Xiaoqing, Yang Jianyi *et al.*. Analytical model of thermal field in the polymer thermo-optic devices. *Chin. J. Semiconductors*, 2004, **25**(8): 995~999 (in Chinese)
余辉,江晓清,杨建义等. 有机聚合物热光器件热场的解析模型[J]. *半导体学报*, 2004, **25**(8): 995~999