

声光可调谐滤波器(AOTF)之模分离器的研究及设计

平均芬¹, 乐孜纯²

(1. 浙江广播电视大学 萧山学院, 浙江 萧山 311201; 2. 浙江工业大学, 浙江 杭州 310032)

摘要: 声光可调谐滤波器的设计关键是它的各个模块, 包括光波导、模分离器、声波导和叉指换能器的参数设计。采用 BPM 方法计算了模分离器中对称模和非对称模的相位差, 得到了 TE 模具有 100% 的转换率, 而 TM 模的转换率为 0 时所对应的中央耦合部分长度 L_c 和分叉角 θ 之间的关系曲线。从该曲线可以得到同时满足 TE 模叉通和 TM 模直通条件的 L_c 和 θ 。最后, 再次利用 BPM 这一工具, 对所设计的模分离器进行了性能分析。

关键词: 声光可调谐滤波器; 模分离器; TM/TE 模; 参数设计

中图分类号: TN65-34

文献标识码: A

文章编号: 1004-373X(2012)10-0112-03

Research and design of mode splitter in AOTF

PING Jun-fen¹, LE Zi-chun²

(1. Xiaoshan Campus, Zhejiang Radio and Television University, Xiaoshan 311201, China; 2. Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract: The modules of optical waveguide, surface acoustic waveguide and mode splitter, and the parameter design of interdigital transducer are most important in the design of acousto-optical tunable filter (AOTF). The phase difference between symmetrical mode and asymmetric mode in the mode-splitter was calculated with BPM method. The design results that TE mode has 100% conversion efficiency, and the relation curve of coupling length and forficcate angle (while the conversion efficiency of TM mode is zero) were obtained. From the curve, and which satisfy the condition of TE mode and TM mode simultaneously can be obtained. The performance analysis of the mode-splitter designed in this way was carried out by the aid of BPM.

Keywords: AOTF; mode splitter; TM/TE mode; parameter design

声光可调谐滤波器作为一种关键的光学导波单元, 在光通信领域中有着巨大的应用前景。其中, 模分离器是一个关键器件, 它的性能优劣直接影响了整个器件的性能指标^[1]。集成光学模分离器的种类很多, 按工作原理可以分成两大类: 第一类是利用模分离器中传播波的基模和一阶模的传播常数的不同, 通过模间的干涉来实现 TE/TM 模的分离, 如指向耦合器型和交叉型模分离器; 第二类模分离器利用分叉波导结构的非对称导致的模传播常数的不同, 使 TE/TM 模在出口端分离, 如 Y 结型模分离器。在实际光通信领域中, 为了与其他的光通信器件耦合, 模分离器需要有固定的光波导宽度和尽量对称的结构。因此, 第一类模分离器, 特别是指向耦合器型模分离器有更好的应用前景^[2]。本文采用 BPM 法设计了一种模分离器。

1 模分离器的结构与原理

模分离器的总体结构图如图 1 所示。它由三部分组成: 两端的分叉波导结构(A 和 C)和中间的 $14\ \mu\text{m}$ 宽的双模波导(B)。

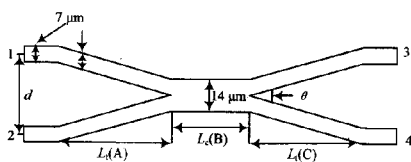


图 1 模分离器结构示意图

由于 TM/TE 模的相互偏振独立, 模分离器的作用原理可以用双模干涉理论来解释, 如图 1 所示。其中, TM/TE 模从端口 1 或端口 2 入射后, 进入分叉波导的相互作用区域后, 会激起两个模: 基模和一阶模, 若从模分离器的水平中心对称线看, 可以把它们当作对称模和反对称模。对称模和反对称模是相干的, 在整个作用区域传播时, 二者会发生相互干涉^[3]。当满足下面条件:

$$\Delta\varphi(L) = \varphi_{\text{sys}}(L) - \varphi_{\text{asys}}(L) = \begin{cases} n\pi, & \text{准 TE 模} \\ m\pi, & \text{准 TM 模} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $|n-m| = 2k-1, k=1, 2, \dots$; φ_{sys} 和 φ_{asys} 分别表示对称模和反对称模的相位改变。

根据 n 是偶数或奇数, TE 模的对称模和反对称模在作用区末端发生相长或相消干涉; 同时, TM 模的情况刚好相反, 发生相消或相长干涉。这样 TE, TM 模就分别从端口 3 或端口 4 出射, 从而实现模的分离。对称

模和反对称模相互干涉,它们的相位差由模分离器 3 个部分相位差之和组成。模分离器的 A 部分和 C 部分的相位差是相同的,由于对称模和反对称模的传播常数随着径向传导距离而不同,所以它们的相位差是一个积分式:

$$\Delta\varphi_i(L_i)=\int_0^{L_i}\beta_s(z)dz-\int_0^{L_i}\beta_a(z)dz\tag{2}$$

当模传导到径向位置 L_i 处,模场分布 $\psi(x,y,L_i)$ 可以表示为:

$$\psi(x,y,L_i)=\sum_{\mu}A_{\mu}\exp(-i\varphi_{\mu})\psi_{0,\mu}(x,y),\mu=s,a\tag{3}$$

式中 $\psi_{0,\mu}(x,y)$ 是 $14\text{ }\mu\text{m}$ 宽波导的归一化对称和反对称场分布,利用其正交归一性:

$$\iint\psi_{0,\mu}(x,y)\psi_{0,\nu}(x,y)dxdy=\delta_{\mu\nu}P\tag{4}$$

计算式(4)的重叠积分,化简可得:

$$b_{\mu}=A_{\mu}P\exp(-i\varphi_{\mu})=\iint\psi(x,y,L_i)\psi_{0,\mu}(x,y)dxdy\tag{5}$$

故对称模和反对称模的相位差可以写成:

$$\Delta\varphi_i=\varphi_{i,s}-\varphi_{i,a}=-\arg b_s+\arg b_a\tag{6}$$

分叉波导的相互作用距离 L_i 只与波导的分叉角度 θ 有关,故相位差 $\Delta\varphi_i$ 与分叉波导的分叉角度 θ 有关^[4]。光波(TM/TE)在模分离器的中间双模波导中传导时,激起的对称模和反对称模的相位差为:

$$\Delta\varphi_c=\varphi_{L_c,s}-\varphi_{L_c,a}=(\beta_s-\beta_a)L_c\tag{7}$$

故式(7)可以改写成:

$$\Delta\varphi(L)=\Delta\beta_cL_c+2\Delta\varphi_i=\begin{cases}n\pi,&\text{TE}\\m\pi,&\text{TM}\end{cases}\tag{8}$$

式中: $\Delta\beta_c$ 代表 $\Delta\beta_{\text{TE}}$ (对 TE 模)或 $\Delta\beta_{\text{TM}}$ (对 TM 模),代表 TE 模的整数 n 和代表 TM 模的整数 m 的奇偶性不同,只有当 n 代表的曲线和 m 代表的曲线有交点时,才能同时满足式(8),实现 TM/TE 模的分离^[5]。

2 模分离器的参数确定

在实际的模分离器中,考虑到光刻工艺的需要,两交叉波导之间不能是如图 1 所示的一个“尖劈”,这个“尖劈”的顶部还必须有一个台,如图 2 所示。这个台的宽度对结构优化有重要的作用,在此固定台宽为 $1.2\text{ }\mu\text{m}$ 。

2.1 $\Delta\beta_c$ 的计算

用 BPM 法计算 $14\text{ }\mu\text{m}$ 宽双模波导导模(对称模和反对称模)的模场分布,可以得到两个有效折射率,这说明在 $14\text{ }\mu\text{m}$ 宽的波导中有两个模式存在。对于 TE 模来说,其对称模和反对称模的有效折射率分别是 $2.143\text{ }782$ 和 $2.139\text{ }307$,通过一维快速傅里叶变换可以

求出 TM 的对称模和反对称模的模传播常数差是 $\Delta\beta_{\text{TE}}=0.016\text{ }587$ 。对于 TM 模,其对称模和反对称模的有效折射率分别是 $2.211\text{ }86$ 和 2.211 ,同样可以得到它的对称模和反对称模的有效折射率。 $\Delta\beta_{\text{TM}}=0.002\text{ }986$ 。根据式(7)可以得到,对称模和反对称模在中央耦合区的相位差 $\Delta\varphi_c$ 。由于中心两个最低阶模相位常数的差值 $\Delta\beta_c$ 已经确定,所以 $\Delta\varphi_c$ 只与 L_c 有关^[6]。

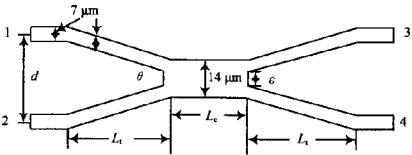


图 2 交叉波导间有台的模分离器结构示意图

2.2 $\Delta\varphi_i$ 的计算

为了计算 $\Delta\varphi_i$ (传输末端的位相差),先用 BPM 法和傅里叶变换法求出宽度为 $7\text{ }\mu\text{m}$ 的单模波导中 TE 模和 TM 导模的分布,再以这些导模分布作为输入场,用 BPM 法计算出 $z=L_i$ 处的场分布 $\varphi(x,y,L_i)$,再由式(6)和式(8)计算出 $\Delta\varphi_i$ 。 $\Delta\varphi_i$ 与分叉角 θ 及台宽 ε 有关。固定 $\varepsilon=1.2\text{ }\mu\text{m}$,图 3 给出了不同 n,m 值(n 与 m 的差为奇数)的 L_c 与 θ 的关系,只有当两组曲线有交点时,才同时满足 TE、TM 模的位相差改变恰好相差 π 的奇数倍,实现 TE 模和 TM 模的分离^[7]。从图 3 可以知道,当 n,m 分别取 $3,2$ 时有交点,故模分离器的两个结构参数是: $\theta=0.5^\circ$, $L_c=360\text{ }\mu\text{m}$ 。这时 TE 是叉通的,从模分离器的出口端 4 出射;而 TM 模是直通的从端口 3 出射。

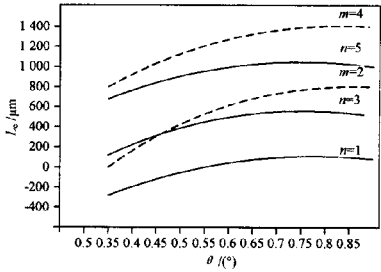


图 3 模分离器分叉角 θ 和中心波导 L_c 的关系曲线

3 AOTF 性能分析

AOTF 中,模分离器要起到偏振分束作用,提供的消光比越高越好, L_c 与 θ 的选择对消光比的影响很大^[8]。利用 BPM 进一步验证 L_c 与 θ 的对应关系。在模拟过程中,固定 $\theta=0.5^\circ$ 不变,通过选择不同的 L_c 来进行模拟。在分别分析 $L_c=360\text{ }\mu\text{m}$ 时 $1\text{ }\mu\text{m},5\text{ }\mu\text{m},15\text{ }\mu\text{m},25\text{ }\mu\text{m},60\text{ }\mu\text{m}$ 等点处的模式分离性能后发现,在 $L_c=360\text{ }\mu\text{m},\theta=0.5^\circ$ 处,TE 模转换效率较高,而 TM 模基本上能保持直通,此时模分离器的消光比最

高,性能最好。但是随着 L_c 的增大或者减小,消光比逐渐变小,说明性能逐渐变差。按照这个规律下去,当 L_c 进一步远离 $L_c = 360 \mu\text{m}$ 时,会出现 TE 模直通和 TM 模直通的情况。图 4 给出了部分模式转换效率模拟图,包括 $L_c = 360 \mu\text{m}$, $L_c = 335 \mu\text{m}$, $L_c = 385 \mu\text{m}$, $L_c = 300 \mu\text{m}$, $L_c = 400 \mu\text{m}$ 处的模拟图。

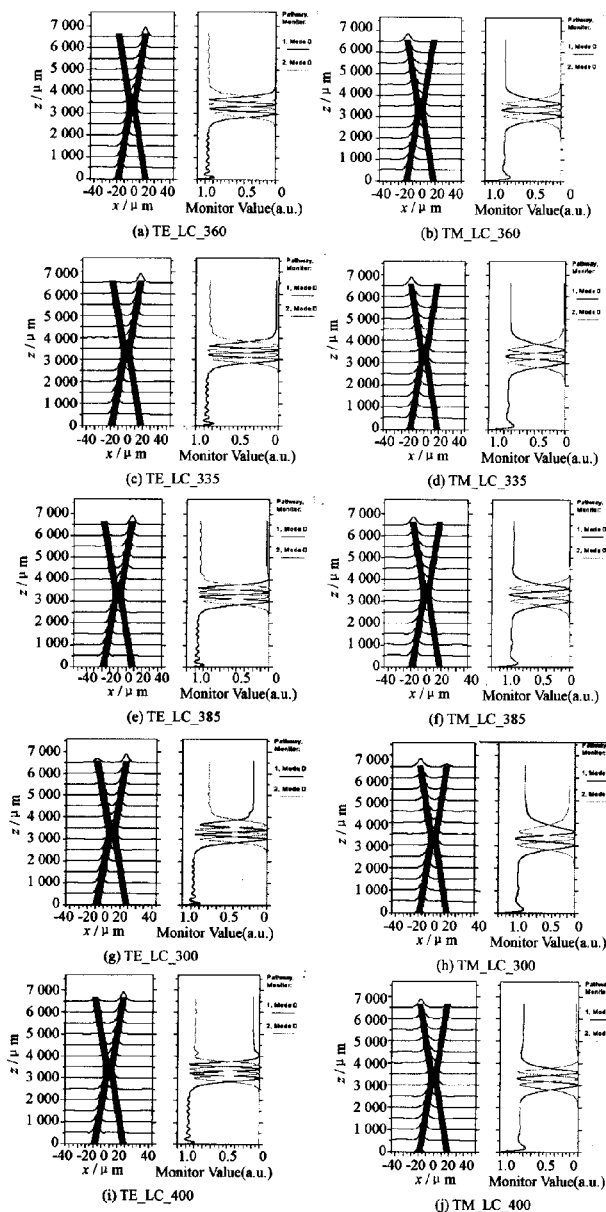


图 4 模分离器 BPM 仿真分析图

分析以上各图,monitor value 中的实线曲线 1 和虚线曲线 2 表征了波导中光功率的变化。借助图 5 进行分析,假设光波从 A 端输入,输入光功率接近 1,而 B

端口的输入光功率开始为 0。光波在中央耦合区 E 部分不断发生耦合。对于 TE 模,希望它逐渐耦合进 D 波导,而 TM 模则希望它耦合进 C 波导^[9]。这样就可以实现 TM 模直通,而 TE 模叉通。通过比较以上各图可以发现,当取 $L_c = 360 \mu\text{m}$ 这个参数时,TE 模的功率基本上全部转换到了 D 波导,而 TM 模的功率基本上保持在 C 波导中^[3]。这说明它的转换效率高,模分离器的性能比较好。随着 L_c 逐渐偏离 $360 \mu\text{m}$,TE 模的转换效率逐渐降低,而 TM 模也有越来越多的功率泄露出原来的波导,性能逐渐变差。

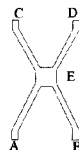


图 5 TM/TE 模转换

4 结 语

模分离器是声光可调谐滤波器实现不依赖于偏振特性的主要功能部分。本文采用 BPM 法设计的模分离器,确定了以下参数:光传输部分的长度 L_t ,中央耦合区的长度 L_c ,波导的分叉角 θ ,以及分叉的两个单模波导之间的距离 d 。该器件设计对整个声光滤波器的设计起到重要的作用。

参 考 文 献

- [1] 林金桐. 光纤通信技术最新进展[D]. 北京:北京理工大学,2001.
- [2] 张海斌. 不依赖于偏振的声光可调谐滤波器[D]. 天津:天津大学,2002.
- [3] 梁瑞林. 集成光路[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [4] 胡鸿璋,戴和义,赵慈. 共线声光耦合的集成光学 TE/TM 模转换器[J]. 光子学报,1997,26(4):340-343.
- [5] 池永江,朱广信,王潇潇,等. 声光可调谐滤波器(AOTF)的射频控制电路的实现[J]. 中国有线电视,2005(23):2305-2308.
- [6] 谢海宴,胡鸿璋,张胜军,等. 偏振无关集成光学反射镜的研制[J]. 中国激光,2003(8):691-694.
- [7] 黄晖,胡鸿璋,李云那. 集成光学 TE/TM 模分离器的研制[J]. 中国激光,2002,29(3):249-252.
- [8] XU Ke-xin, NI Yong, XUE Bin, et al. The optical characteristics of the acousto-optic tunable filter with the equivalent point[J]. Chinese Journal of Lasers B, 2002, 11(2): 133-138.
- [9] 王景山. 声表面波器件模拟与仿真及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,2002.

作者简介:平均芬 女,1978 年出生,浙江杭州人,硕士,讲师。主要从事电子通信方面的教学和科研工作。

微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养, 是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司, 以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题, 有资深工程师领衔主讲, 课程既有微波滤波器设计原理的详细解释, 也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解, 设计原理和设计仿真实践相结合, 向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频, 专家授课, 中文讲解, 直观易学; 既有微波滤波器设计原理的详细解释, 也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解, 旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

更多专业培训课程:

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>