

37. M-Z 型光滤波器性能研究

王翠珍 李廷军 潘殿文 唐金元

(海军航空工程学院电子系 山东烟台 264001)

摘要:介绍了 Mach-Zehnder 型光滤波器的结构,分析了其功率传输特性,针对该型光滤波器功率传输带宽较窄、锐截止特性较差的特点,提出了一种在 Mach-Zehnder 光滤波器波导短臂上插入光环形腔的改进型新结构方案。理论分析表明,该改进型 Mach-Zehnder 光滤波器功率传输带宽较宽,锐截止特性较好,可望在超密集波分复用(UDWDM)光纤通信的复用/去复用技术中得到应用。

关键词:光滤波器 植合器 功率传输特性 光环形腔

一、引言

超密集波分复用(Ultra Dense Wave Division Multiplexing, UDWDM)光纤通信是目前光纤通信研究领域中的研究热点之一^[1]。在 UDWDM 光纤通信系统中,复用/去复用器是其中的关键器件。用于 UDWDM 光纤通信的复用/去复用器,主要有熔锥光纤型、光纤光栅型、干涉滤波器型和集成光波导型等类型^[2],干涉滤波器型中的 Mach-Zehnder 干涉仪型光滤波器具有很好的波长选择性,可以提供非常小的波长间隔(最小可达 0.04nm)、非常窄的频率间隔(在 C 波段,0.04nm 波长间隔对应约 2.5GHz 频率间隔,理论上可实现 1600 个信道复用),并可用成熟的 Si 波导集成技术制造。将若干个这种具有双波长信号复接/分接功能的光滤波器串接起来,可构成一个多波长信号复用器或去复用器。Mach-Zehnder 干涉仪型光滤波器作为复用/去复用器在 UDWDM 光纤通信中有着非常美好的应用前景。

本文在分析 Mach-Zehnder 干涉仪型光

滤波器功率传输特性的基础上,根据实际应用要求,提出一种改进型结构,分析表明,此结构能有效地改进其滤波特性。

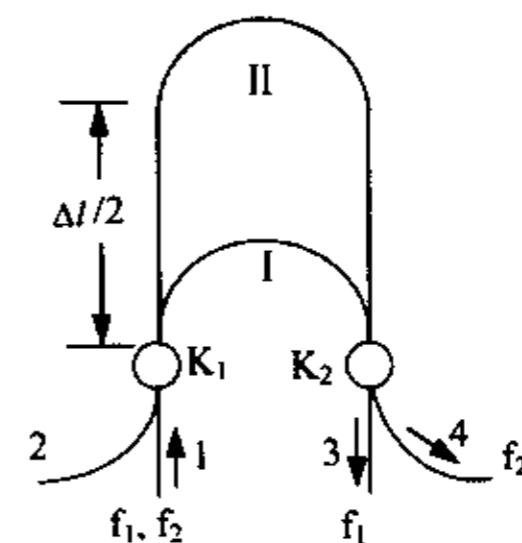


图 1 Mach-Zehnder
型光滤波器结构

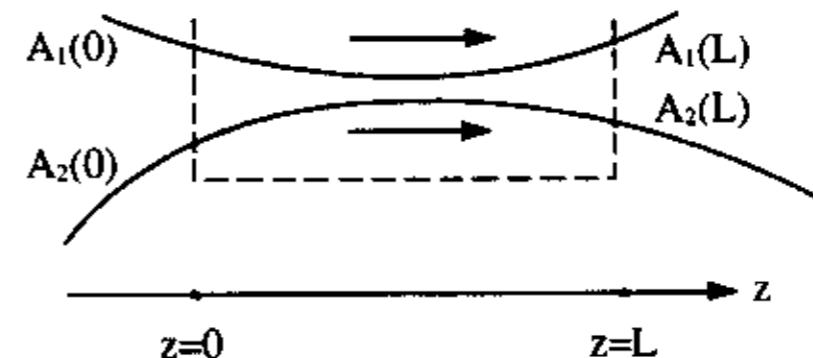


图 2 定向耦合器原理图

二、Mach-Zehnder 型光滤波器结构及传输特性分析

该滤波器的基本构成如图 1 所示, 它由两个定向耦合器(设幅度耦合系数分别为 K_1 和 K_2)及其连接波导(两波导臂 I、II 长度不等, 设长度差为 Δl)组成, 由于结构上类似于 Mach-Zehnder 干涉测量仪, 因此通常称为 Mach-Zehnder 干涉仪型光周期性滤波器(简称 Mach-Zehnder 型光滤波器)。

定向耦合器是由两个相距很近(μm 级间距)的光波导构成, 两波导中的导模沿同向传播。其原理如图 2 所示, $A_1(0)$, $A_2(0)$ 为定向耦合器两个输入端口的光波场幅, $A_1(L)$, $A_2(L)$ 为两个输出端口光波场幅, L 为耦合长度。根据波导模式耦合理论, 当两导模同相耦合且满足相位匹配条件时, 两导模间幅度耦合方程为:

$$A_1(z) = \cos(k_c z) A_1(0) - j \sin(k_c z) A_2(0),$$

$$A_2(z) = -j \sin(k_c z) A_1(0) + \cos(k_c z) A_2(0)$$

式中, $0 < z < L$, 而 k_c 为模式耦合系数。

在 $z=L$, 即在定向耦合器输出端, 可得到:

$$A_1(L) = \sqrt{1 - K^2} A_1(0) - j A_2(0)$$

$$\begin{aligned} T_{1 \rightarrow 3} &= \left| \frac{E_{out1}}{E_{in}} \right|^2 \\ &= e^{-2a_s l_{145}} \left[4K_1 K_2 \sqrt{(1 - K_1^2)(1 - K_2^2)} e^{-a_s \Delta l} \sin^2 \frac{\beta \Delta l}{2} \right. \\ &\quad \left. + (K_1 K_2 - \sqrt{(1 - K_1^2)(1 - K_2^2)} e^{-a_s \Delta l})^2 \right] \\ &= e^{-2a_s l_{146}} \left[4K_1 K_2 \sqrt{(1 - K_1^2)(1 - K_2^2)} e^{-a_s \Delta l} \cos^2 \frac{\beta \Delta l}{2} \right. \\ &\quad \left. + (K_1 \sqrt{1 - K_2^2} - \sqrt{(1 - K_1^2)K_2} e^{-a_s \Delta l})^2 \right] \end{aligned}$$

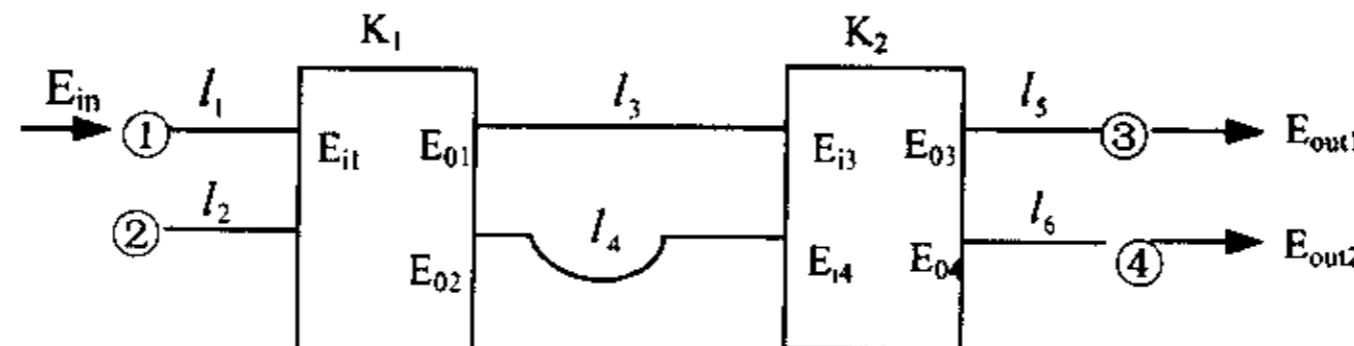


图 3 Mach-Zehnder 光滤波器传输特性分析模型

$$A_2(L) = -j K A_1(0) + \sqrt{1 - K^2} A_2(0)$$

这里 $K = \sin(k_c L)$, $K \in [0, 1]$

Mach-Zehnder 光滤波器传输特性分析模型如图 3 所示。图中, K_1 , K_2 分别为两个定向耦合器幅度耦合系数, l_1 , l_2 , l_3 , l_4 分别为输入端口和输出端口到相应定向耦合器的距离长度, l_3 , l_4 分别为两个定向耦合器之间波导连接的短臂和长臂长度。设进入滤波器端口 1 的光波场幅为 E_{in} , 根据光波传播理论和定向耦合器的幅度耦合方程, 在第一个定向耦合器输入、输出端有: $E_{i1} = E_{in} e^{-j(\beta - \alpha_s)l_1}$, $E_{o1} = \sqrt{1 - K_1^2} E_{i1}$, $E_{o2} = -j K_1 E_{i1}$, 其中, β , α_s 分别为光波相位常数和损耗系数。

在第二个定向耦合器输入端和输出端分别有:

$$E_{i3} = E_{o1} e^{-j(\beta - \alpha_s)l_3}$$

$$E_{i4} = E_{o2} e^{-j(\beta - \alpha_s)l_4}$$

$$E_{o3} = \sqrt{1 - K_2^2} E_{i3} - j K_2 E_{i4}$$

$$E_{o4} = -j K_2 E_{i3} + \sqrt{1 - K_2^2} E_{i4}$$

在滤波器输出端口 3, 4 有:

$$E_{out1} = E_{o3} e^{-j(\beta - \alpha_s)l_5}, E_{out2} = E_{o4} e^{-j(\beta - \alpha_s)l_6}$$

经上列公式代换并整理后可得:

$$T_{1 \rightarrow 3} = \left| \frac{E_{out1}}{E_{in}} \right|^2$$

式中, $\Delta l = l_4 - l_3$ 为两连接波导臂间的长度差, $l_{135} = l_1 + l_3 + l_5$, $l_{145} = l_1 + l_4 + l_5$, $l_{136} = l_1 + l_3 + l_6$, $l_{135} = l_1 + l_4 + l_6$ 。

当 $K_1^2 = K_2^2 = \frac{1}{2}$ 时, 即两个定向耦合器均为理想 3dB 耦合器时, 且 $\alpha_s = 0$ (光波导无损耗) 时, 滤波器的功率传输率为:

$$T_{1 \rightarrow 3} = \sin^2 \frac{\beta \Delta l}{2} = \sin^2 K f,$$

$$T_{1 \rightarrow 4} = \cos^2 \frac{\beta \Delta l}{2} = \cos^2 K f$$

其中 $K = n\pi \Delta l / c$, n 为光波导有效折射率, c 为真空中光速, f 为光波频率, $\beta \approx 2n\pi f / c$ 。Mach-Zehnder 型光周期性滤波器的功率传输特性如图 4 所示。从图 4 可以看出, 该滤波器功率传输为正(余)弦平方律关系, 对频率具有周期性: $f_T = \pi / K$, 在 UDWDM 通信系统中, 利用该滤波器可实现对多路光波信号的复用和去复用。当 $m = 0, 1, 2, \dots$ 时, 对 f_1 , 有 $T_{1 \rightarrow 3} = 1, T_{1 \rightarrow 4} = 0$; 对 f_2 , 有 $T_{1 \rightarrow 3} = 0, T_{1 \rightarrow 4} = 1$ 。这样, 在输出端口 3, 便可获得 f_1 信号, 在端口 4, 获得 f_2 信号, 从而实现了对 2 路光信号的去复用。同理, 若将端口 3 和端口 4 作为输入端, 分别输入 f_1 和 f_2 信号, 则在端口 1 可获得输出频率复用的 f_1, f_2 从而实现了对 2 路信号的复用作用。

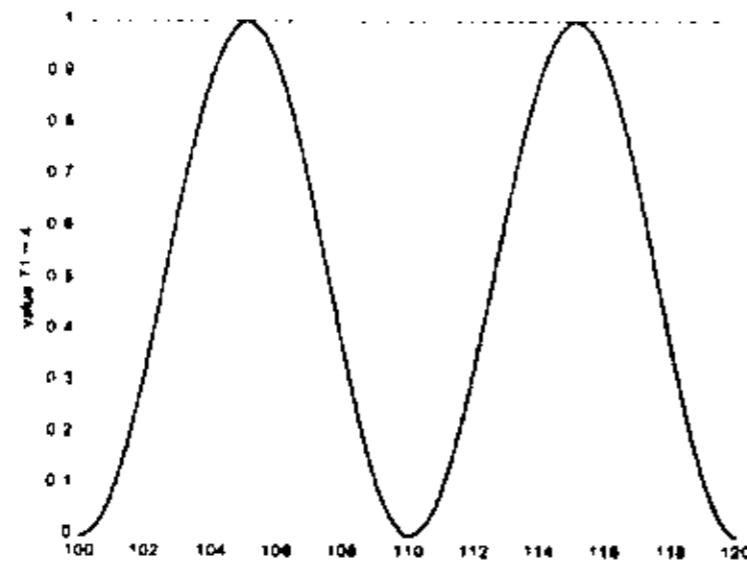


图 4 光滤波器功率传输特性
($T_{1 \rightarrow 4}$) 曲线图

从图 4 可以看出: Mach-Zehnder 型光周期性滤波器具有正(余)弦平方律型功率传输特性, 使该滤波器在 UDWDM 通信系统的复用/去复用应用中显得不够理想。应用该滤波器对

多路信号进行复用和去复用, 将引起较为严重的插入损耗和信道串扰。如果能设计出一种既能具有锐截止特性、又具有较大平坦可用带宽的光周期性滤波器, 在 UDWDM 光纤通信系统中用于对多路信号的复用和去复用, 那么, 将大大降低频偏的影响, 减少 UDWDM 光纤通信系统的插入损耗和信道串扰。

三、改进型 Mach-Zehnder 滤波器的结构与传输特性

通过对光环形腔滤波器的传输特性分析发现, 光环形腔滤波器具有良好的频率截止特性, 其滤波特性曲线几乎接近矩形形状。但是, 环形腔滤波器的带宽很窄, 又不具有周期性滤波特性, 无法用单独的光环形腔来实现对 UDWDM 通信系统多路信号的复用和去复用。从改善 Mach-Zehnder 型光滤波器特性出发, 提出一种在该滤波器的波导短臂上插入一光环形腔结构的改进型 Mach-Zehnder 光滤波器新结构方案。

1. 结构

图 5 为光环形腔结构图, 图 6 为改进型 Mach-Zehnder 光滤波器滤波器结构。

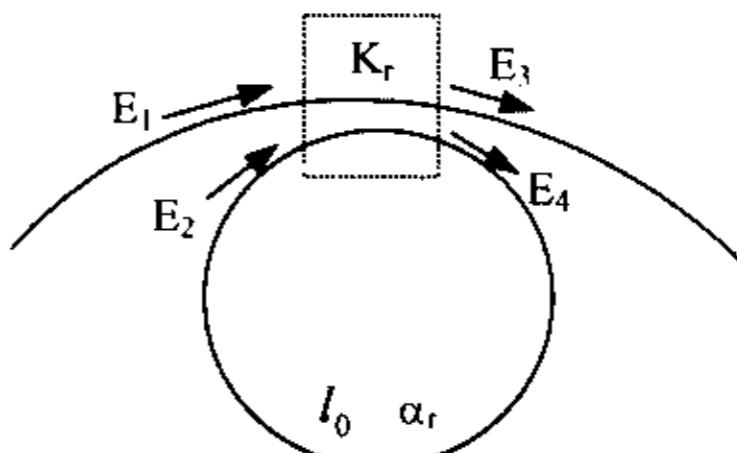


图 5 光环形腔结构图

2. 传输特性分析

如图 5 所示, K_r 、 L_0 和 α_r 分别是环形腔定向耦合器的幅度耦合系数、环形结构长度和光波损耗系数, E_1 为输入光波场幅。

$$E_3 = \sqrt{1 - K_r^2} E_1 - j K_r E_2,$$

$$E_4 = -j K_r E_1 + \sqrt{1 - K_r^2} E_2$$

因 $E_2 = E_4 e^{-j(\beta - \alpha_r)L_0}$

可求得环形腔结构的幅度传输率:

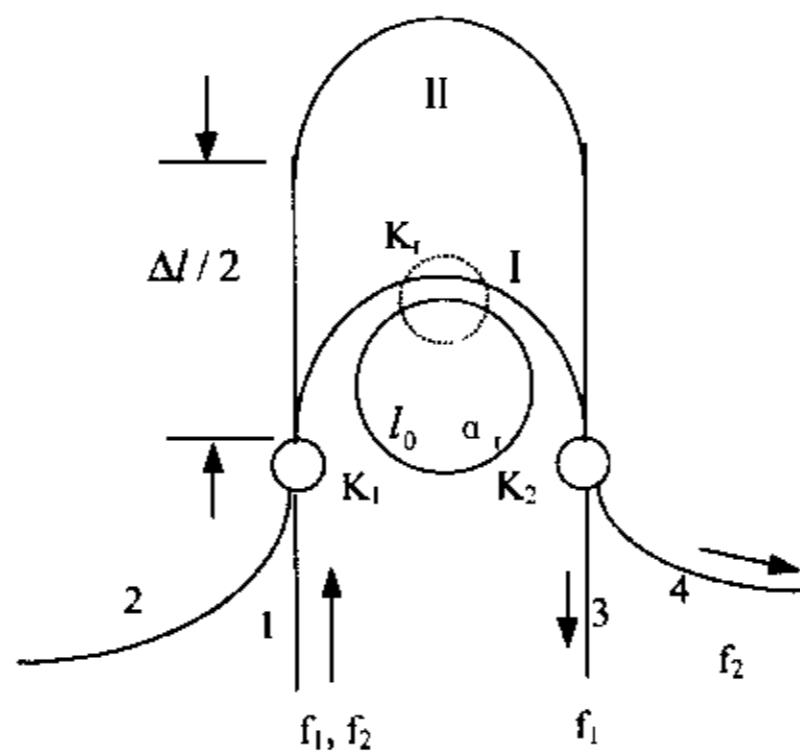


图 6 Mach-Zehnder 改进型光滤波器结构

$$A_r = \frac{E_3}{E_1} = \frac{P - e^{-j(\beta - j\alpha_r)l_0}}{1 - Pe^{-j(\beta - j\alpha_r)l_0}} = Ae^{-\beta l}$$

其中, $P = \sqrt{1 - K_r^2} \in [1, 0]$

$$A = \sqrt{\frac{(P - e^{-\varphi}\cos\theta)^2 + e^{-2\varphi}\sin^2\theta}{(1 - Pe^{-\varphi}\cos\theta)^2 + P^2e^{-2\varphi}\sin^2\theta}}$$

$$\phi = \operatorname{tg}^{-1} \frac{(1 - P^2)e^{-\varphi}\sin\theta}{(1 + e^{-2\varphi})P - (P^2 + 1)e^{-\varphi}\cos\theta}$$

式中, $\varphi = \alpha_r l_0$, $\theta = \beta l_0$, 当 $\alpha_r = 0$ 时, 环形

$$T_{1 \rightarrow 3} = \left| \frac{E_{out1}}{E_m} \right|^2 = e^{-2\alpha_r l_{145}} \left\{ 4K_1 K_2 \sqrt{(1 - K_1^2)(1 - K_2^2)} A e^{-\alpha_r \Delta l} \sin^2 \frac{\varphi - \beta \Delta l}{2} + (K_1 K_2 - \sqrt{(1 - K_1^2)(1 - K_2^2)} A e^{-\alpha_r \Delta l})^2 \right\}$$

$$T_{1 \rightarrow 4} = \left| \frac{E_{out2}}{E_m} \right|^2 = e^{-2\alpha_r l_{146}} \left\{ 4K_1 K_2 \sqrt{(1 - K_1^2)(1 - K_2^2)} A e^{-\alpha_r \Delta l} \cos^2 \frac{\varphi - \beta \Delta l}{2} + (K_1 \sqrt{1 - K_2^2} - \sqrt{1 - K_1^2} K_2 A e^{-\alpha_r \Delta l})^2 \right\}$$

当 $K_1^2 = K_2^2 = \frac{1}{2}$, 即两个定向耦合器为理

想 3dB 耦合器时, 且 $\alpha_r = 0$, $\alpha_r = 0$, 即光波导无传输损耗时, 功率传输公式为:

$$T_{1 \rightarrow 3} = \sin^2 \frac{\phi - \beta \Delta l}{2}, \quad T_{1 \rightarrow 4} = \cos^2 \frac{\phi - \beta \Delta l}{2}$$

比较结构改进前、后简化的 Mach-Zehnder 型光滤波器功率传输率表达式可以看出, 改进后光滤波器功率传输表达式较改进前增加了环型腔结构的相位延迟分量 ϕ , ϕ 为

腔无传输损耗时, 有: $A = 1$, $\phi = \operatorname{tg}^{-1} \frac{(1 - P^2)\sin\theta}{2P - (P^2 + 1)\cos\theta}$ A 、 ϕ 分别是环形腔结构的幅度特性和相位延迟特性, $\theta = \beta l_0$ 为环形结构的电长度。这样, 可推得改进后的 Mach-Zehnder 型光滤波器的功率传输特性为:

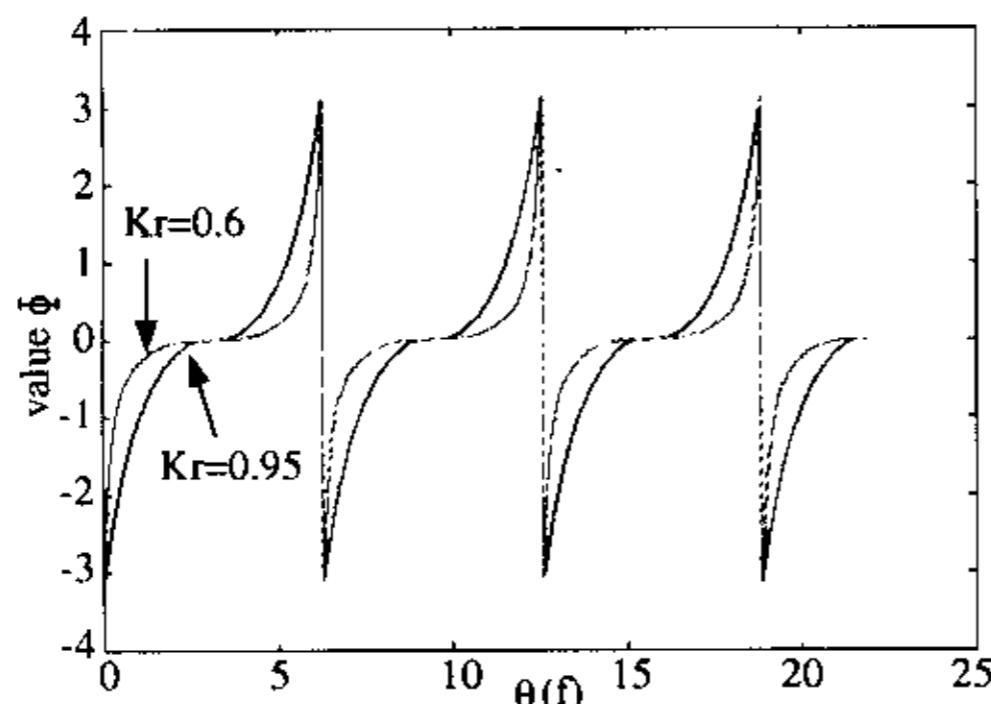
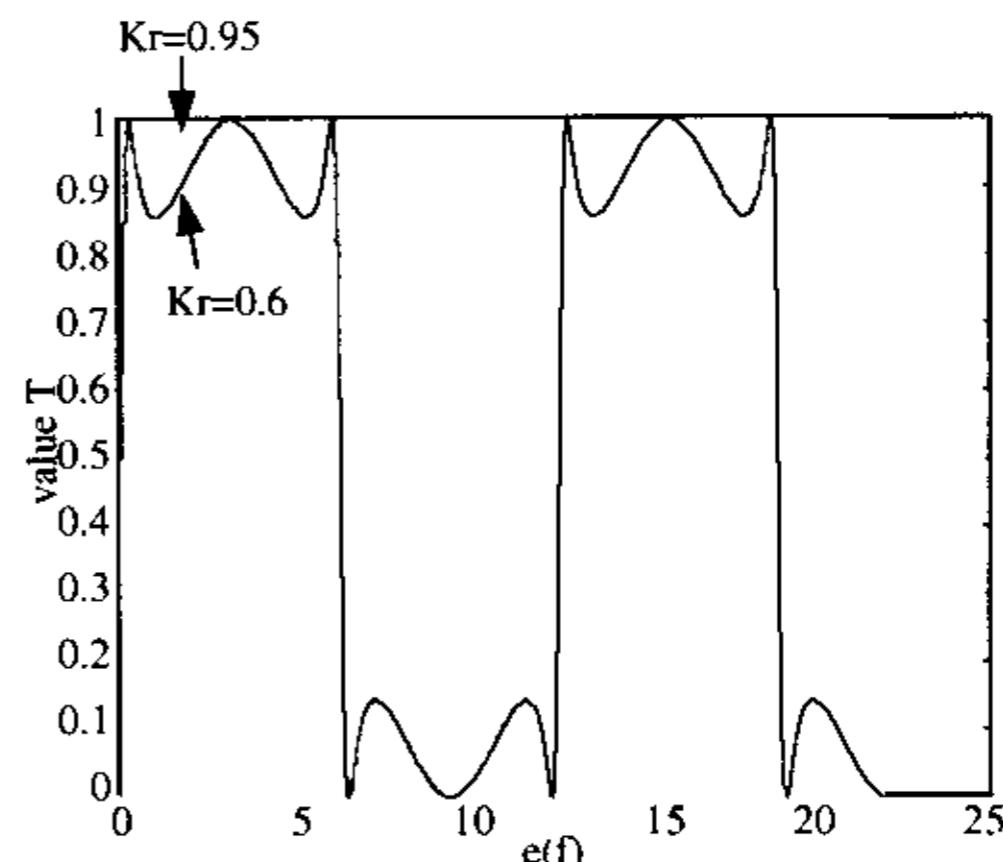
P 和 θ 的函数。

当 $K_r = 0, 1$ ($P = 1, 0$) 时, 改进型滤波器功率传输率仍为正(余)弦平方律型, 具有与为结构改进前滤波器同样的传输特性。

将 ϕ 对 θ 微分, 有:

$$\frac{d\phi}{d\theta} = \frac{1 - P^2}{(P - \cos\theta)^2 + \sin^2\theta}$$

特别地, 在 $\theta = 2n\pi$ (n 为整数, 以下同), 即在环型腔结构谐振处, 有:

图 7 Φ 曲线图图 8 $T_{1\rightarrow 4}$ 曲线图

$$\frac{d\phi}{d\theta} = \frac{1+P}{1-P}$$

在 $\theta = (2n+1)\pi$ 处, 有:

$$\frac{d\phi}{d\theta} = \frac{1-P}{1+P}$$

所以, 当 $K_r \in [0, 1]$, $P \in [1, 0]$ 时, ϕ 随着电长度 θ 呈周期性正增长率变化, 在 $\theta = 2n\pi$ 处, ϕ 具有较大正增长率, 在 $\theta = (2n+1)\pi$ 处, ϕ 具有较少正增长率。

K_r 取不同的值时, ϕ 随 θ 的变化曲线如图 7 所示。该曲线在 $\theta = 2n\pi$ 周围, ϕ 随 θ 急剧增加, 而在 $\theta = (2n+1)\pi$ 周围, ϕ 随 θ 增长较慢, 曲线较平缓。

由于 $\theta = \beta_0 l \approx \frac{2n\pi f_l}{c} l_0$, 所以环形腔结构电长度 θ 与光波频率属于同一轴线。

$$\text{当取: } \beta\Delta l = \frac{\theta}{2} \pm \frac{\pi}{2}$$

这时随着 θ 增加(周期为 2π)一个周期, $(\phi - \beta\Delta l)$ 将增加 π , 使改进形结构功率传输率在 $\theta = (2n+1)\pi$ (n 为整数) 处周期性地取得极值 0 和 1。

当取 $\beta\Delta l = \frac{\theta}{2} \pm \frac{\pi}{2}$ 时, 功率传输特性曲线如图 8 所示。

比较图 4、8 中曲线可以看出, 改进型光滤波器的功率传输特性明显得到改善, 其功

率传输特性曲线接近于矩形形状, 具有较好的锐截止特性, 带宽明显增大。在 UDWDM 通信系统中, 将这种改进型 Mach-Zehnder 型光周期性滤波器结构用于对多路信号的复用和去复用, 可以减少复用损耗和信道串扰, 大大提高信号传输质量。

四、结束语

本文从改善 Mach-Zehnder 型光滤波器的滤波特性出发, 提出了一种改进型 Mach-Zehnder 光滤波器, 即在此型光滤波器的波导短臂上插入光环形腔来改善其滤波性能。理论分析表明, 该改进型 Mach-Zehnder 光滤波器带宽较宽, 锐截止特性较好, 其滤波性能明显得到改善。

本文的理论推导是在假设光波导衰减系数 $\alpha_s = 0$, $\alpha_r = 0$ 的情况下进行的, 但实际中光波导、光环形腔、光纤的衰耗总是存在的, 实际生产、工程计算都必须考虑。

参考文献

- 王翠珍, 邱丽波, 李廷军, 唐金元. UDWDM 光纤通信关键技术[J]645~648. 海军航空工程学院学报, 2002(6)
- 王翠珍, 李廷军, 唐金元. 超密集波分复用光纤通信及其关键技术[J]16~19. 现代电子技术,

2002(5)

- 3 徐宏进,何据,蒋剑良.光通信器件与系统[M] 88~99.北京:人民邮电出版社,2002
4 高启祥.密集波分复用技术导论[M]19~35.北

京:人民邮电出版社,2001

(李廷军:电话 0535—6181699, E-mail: ltjq99@
263.net 地址:烟台市二马路付 190 号—6—11,
264001)

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，致力于专注于微波、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/>