

文章编号: 0258-7025(2001)11-1017-04

用于 DWDM 系统的双折射型 Interleaver 原理分析*

蔡燕民¹ 王昕歌² 赵岭¹ 方祖捷¹ 陈高庭¹ 王向朝¹

(¹ 中国科学院上海光机所信息光学实验室 上海 201800, ² 上海市计量测试技术研究院 上海 200040)

摘要 介绍了交叉复用器(Interleaver)在密集波分复用(DWDM)光纤通信系统中的作用,利用各向异性晶体的双折射和偏振光的干涉分析了双折射型 Interleaver 器件的原理,给出了一种双折射型 Interleaver 与薄膜滤波器混合结构的 DWDM 光纤通信系统的概念设计。

关键词 交叉复用器,密集波分复用,双折射

中图分类号 O 438; O 734 **文献标识码** A

Principle of Birefringence Crystal Type Interleaver Applied in DWDM Fiber System

CAI Yan-min¹ WANG Xin-ge² ZHAO Ling¹

FANG Zu-jie¹ CHEN Gao-ting¹ WANG Xiang-zhao¹

(¹ The Laboratory of Information Optics, Shanghai Institute of

Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800

² Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology, Shanghai 200040)

Abstract Application of interleaver in DWDM fiber communication system is introduced. By means of birefringence crystal plate and polarization beam interference, principle of birefringence crystal type interleaver is analyzed. It is mentioned that a hybrid structure of birefringence crystal type interleaver and film filter is applied in DWDM fiber communication system.

Key words interleaver, DWDM, birefringence

1 引言

光纤通信技术现已成为现代通信系统的基本组成部分,随着国民经济的持续发展,信息交流的日益增多,语音、图像、数据等信息量成爆炸式增长,尤其是因特网的迅速崛起,对通信系统的带宽提出了更高的要求。现代高速大容量光纤通信系统的潮流是在光纤的低损耗窗口减少信道间隔来增加信道数目,利用波分复用/密集波分复用(WDM/DWDM)技术作为今后进一步扩大光纤通信系统容量的首选技术方案,已经成为网络运营者与器件制造商的共识。

按照 WDM/DWDM 器件不同制作方法,可将其分为:熔融拉锥全光纤型、介质薄膜滤波器型、阵列

波导光栅型(AWG)、光纤布喇格光栅型(FBG)^[1]。熔融拉锥全光纤型器件在两波复用系统中已经实用。在目前的 DWDM 系统中,介质薄膜滤波器型是最成熟的,信道间隔为 100 GHz(0.8 nm)的光纤通信系统已经商用化。因为其优点是体积小,温度特性较好(0.5 pm/°C),相邻信道隔离度 > 25 dB,薄膜滤波器型器件是一个很经济的解决方案,然而滤波函数逐渐转移使其难以应用于 50 GHz 或更低信道间隔的系统中。AWG 为集成平面波导器件,在尺寸上有优势,但是偏振相关损耗很高,也要求主动温度控制,功率消耗达瓦级;对于信道数目很大的系统,插入损耗较低。据文献[2]报道,利用 AWG 的传输演示实验系统的指标达到 100 信道,1 Tbit/s 的速率。FBG 温度特性小于 0.3 pm/°C,具有主动温度补偿、滤波函数陡峭的优点,使其在信道间隔 ≤ 50

GHz 的 DWDM 系统中应用很有利,把 FBG 和薄膜滤波器组合起来对于 DWDM 系统是很好的解决方案,然而 FBG 的典型尺寸为厘米量级或更长,级联很多个 FBG 将使器件体积庞大,价格昂贵。

文献[3]提到用取样光纤光栅做交叉复用/解复用器(Interleaver),是将 DWDM 光纤通信系统奇偶信道的信号光作为两组分开或合成以实现信道间隔减半,通信容量倍增的目的。在目前 ITU-T 建议的 100GHz 信道间隔 DWDM 系统中实现 50GHz 的信道间隔,使其容量翻一番。利用晶体的双折射效应和偏振光干涉原理可以将 DWDM 光纤通信系统奇偶信道的信号光分开或合成为偏振态正交的两组,同样可以实现通信容量倍增的效果。

2 原理分析

双折射型 Interleaver(交叉复用器)的作用是利用双折射晶体将 DWDM 光纤通信系统的信道分为奇偶两个信道分支。例如,100 GHz(50 GHz)信道间隔的信号输入,200 GHz(100 GHz)信道间隔的信号输出,如图 1 所示。

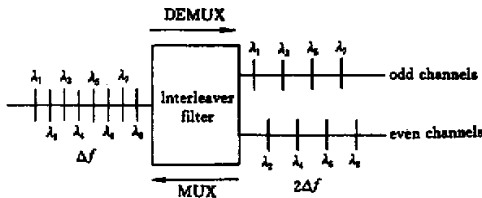


图 1 Interleaver 在 DWDM 系统中的作用
Fig.1 Scheme of interleaver applied in DWDM fiber system

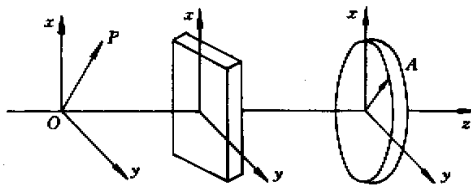


图 2 偏振光经过晶片的干涉
Fig.2 Interference of polarization beam through birefringence crystal plate

下面分析双折射型 Interleaver 原理。考虑一束线偏振光正入射到厚度为 h 的平行平面晶片上,如图 2 所示,进入晶片后,每一条光线分成具有不同传

播速度的两条光线,其 D 矢量在垂直于晶片法线方向的两个相互正交的方向上振动。它们从晶片出射时具有某一位相差 δ 。如果在后面置一偏振片,在偏振片的透射轴上可发生干涉。

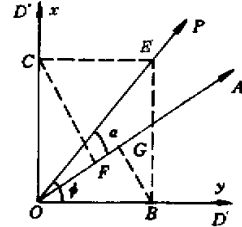


图 3 偏振光的分解
Fig.3 Analysis of polarization beam

在图 2,3 中,取直角坐标系 $oxyz$,使 ox, oy 轴方向为晶片的两个正交的振动方向 D', D'' ,线偏振光沿 oz 轴方向传播,振动方向为 OP ,与 oy 轴成 ϕ 角,检偏器透射轴 OA 和 OP 夹角为 α ,设线偏振光振幅为 $OE = a$,强度为 $I_0 = a^2$,在晶片中将分解成沿 ox, oy 方向振动的两个分量,其振幅分别为

$$\begin{aligned} OC &= a \sin \phi \\ OB &= a \cos \phi \end{aligned} \quad (1)$$

透过晶片之后,该两束光的位相差为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} (n' - n'') h \quad (2)$$

式中 h 为晶片厚度, n', n'' 分别为晶片中沿 ox, oy 方向振动的位相折射率, λ_0 为真空中的波长,这两个分量在检偏器的透射轴方向投影分别为

$$\begin{aligned} OF &= OC \sin(\phi - \alpha) = a \sin \phi \sin(\phi - \alpha) \\ OG &= OB \cos(\phi - \alpha) = a \cos \phi \cos(\phi - \alpha) \end{aligned} \quad (3)$$

这两束光产生的干涉强度为

$$\begin{aligned} I &= OG^2 + OF^2 + 2OG \cdot OF \cos \delta = \\ &= (OG + OF)^2 - 2OG \cdot OF(1 - \cos \delta) \end{aligned} \quad (4)$$

将(3)式代入(4)式,得

$$I = I_0 \left[\cos^2 \alpha - \sin 2\phi \sin 2(\phi - \alpha) \sin^2 \frac{\delta}{2} \right] \quad (5)$$

如果去掉晶片 ($\delta = 0$),则两束光叠加强度应为 $I = I_0 \cos^2 \alpha$,为马吕斯定律所确定,因而(5)式的第二项表示晶片的影响。线偏振光经过晶片的干涉不仅依赖于两束正交的线偏振光的位相差,还依赖于晶片光轴方向与检偏器透射轴的夹角 $(\phi - \alpha)$ 。

下面讨论两种特殊情况。当 OP 与 OA 平行(表示为 $P // A$)时, $\alpha = 0$, (5) 式成为

$$I_{//} = I_0 \left(1 - \sin^2 2\phi \sin^2 \frac{\delta}{2} \right) \quad (6)$$

当 OP 与 OA 垂直(表示为 $P \perp A$) 时, $\alpha = 90^\circ$, 由(5) 式得

$$I_{\perp} = I_0 \sin^2 2\phi \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (7)$$

令 $\phi = 45^\circ$, 则(6), (7) 式分别为

$$I_{//} = I_0 \left(1 - \sin^2 \frac{\delta}{2} \right) \quad (8)$$

$$I_{\perp} = I_0 \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (9)$$

由(8), (9) 式可见, 干涉强度与位相差 δ 有关, 下面讨论不同波长的单色平面波所引起的效果。当(10) 式成立时, $I_{//} = I_0, I_{\perp} = 0$ 。

$$\frac{\delta}{2} = \frac{\pi}{\lambda_0} (n' - n'') h = k\pi, \quad k \text{ 为整数} \quad (10)$$

当(11) 式成立时, $I_{//} = 0, I_{\perp} = I_0$ 。

$$\frac{\delta}{2} = \frac{\pi}{\lambda_0} (n' - n'') h = \left(k + \frac{1}{2} \right) \pi, \quad k \text{ 为整数} \quad (11)$$

即 DWDM 系统的偶数信道的信号光满足(12) 式时, 为同一方向的线偏振光, 奇数信道的信号光满足(13) 式时, 为与偶数信道信号光正交方向的线偏振光。

$$\lambda_0 = \frac{1}{2k} 2(n' - n'') h \quad (12)$$

$$\lambda_0 = \frac{1}{2k+1} 2(n' - n'') h \quad (13)$$

由(12) 式可以得到偶数信道的频率间隔为

$$\Delta f_2 = \frac{c}{(n' - n'') h} \quad (14)$$

式中 c 为真空中光速。由(13) 式可以得到奇数信道的频率间隔为

$$\Delta f_1 = \frac{c}{(n' - n'') h} \quad (15)$$

可见, 奇数信道偶数信道的频率间隔都是均匀的。奇偶信道的频率间隔为

$$\Delta f_{12} = \frac{c}{2(n' - n'') h} \quad (16)$$

譬如在 1550 nm 波段, 令 $\Delta f = \frac{c}{2(n' - n'') h} = 50 \text{ GHz}$, 选择四种单轴晶体计算如下(取光速 $c = 2.99792 \times 10^8$):

	TiO ₂	LiNbO ₃	YVO ₄	CaCO ₃
Δn	0.256	0.0738	0.2039	0.1595
h/mm	11.7106	40.6222	14.7029	18.7957

选择合适厚度的晶片, 选择适当的整数 k , 当 $2k = 3870$ 时, $\lambda_2 = 1549.31 \text{ nm}$; $2k = 3868$ 时, $\lambda_4 = 1550.11 \text{ nm}$; $2k = 3866$ 时, $\lambda_6 = 1550.91 \text{ nm}$; $2k = 3864$ 时, $\lambda_8 = 1551.71 \text{ nm}$ 。当 $2k - 1 = 3869$ 时, $\lambda_1 = 1549.71 \text{ nm}$; $2k - 1 = 3867$ 时, $\lambda_3 = 1550.51 \text{ nm}$; $2k - 1 = 3865$ 时, $\lambda_5 = 1551.31 \text{ nm}$; $2k - 1 = 3863$ 时, $\lambda_7 = 1552.11 \text{ nm}$ 。可见奇数信道间隔 0.8 nm, 偶数信道间隔同样 0.8 nm, 奇数偶数信道间隔 0.4 nm, 符合 ITU-T 的 G. MCS 建议的标准波长系列。

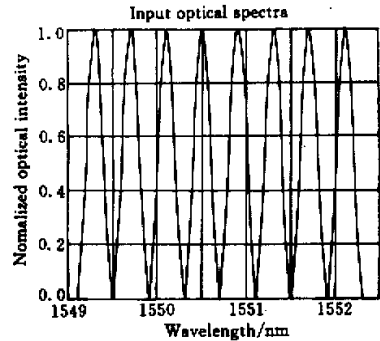


图 4 Interleaver 器件输入光谱

Fig. 4 Input optical spectra of interleaver

利用晶体的双折射效应和偏振光干涉原理制作交叉复用器 Interleaver, 可以使 DWDM 系统传输容量倍增, 同样作为解复用器可以将接收到的光信号间隔先行加宽再处理。我们设计了一种基于双折射晶体的 Interleaver 器件, 由起偏器、位相延迟器、检偏器、分波器、合波器等构成, 相关实验正在筹备进行之中。对这种 Interleaver 器件进行了计算机仿真模拟, 设 Interleaver 器件输入端口的光信号如图 4 所示, 为符合 ITU-T G. MCS 建议的信道间隔 0.4 nm 的 8 波长信号。图 5 (a), (b) 分别为该器件奇数信道、偶数信道输出端口的光谱, 可见两输出端口信号间隔为 0.8 nm。

3 结论

利用双折射晶体的这种性质, 将奇数偶数信道交叉分开或合成, 可以制作复用/解复用器件, 考虑一种与介质薄膜滤波器型 DWDM 器件组成混合结构, 在光纤传输两端的薄膜滤波器的前面增加 Interleaver, 如图 6 所示, 可以使现在 ITU-T 建议的

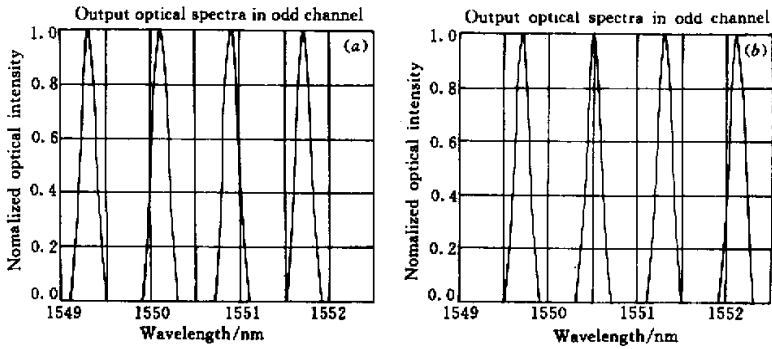


图5 奇信道(a)和偶信道(b)输出光谱

Fig.5 Output optical spectra in odd channels (a) and in even channels (b)

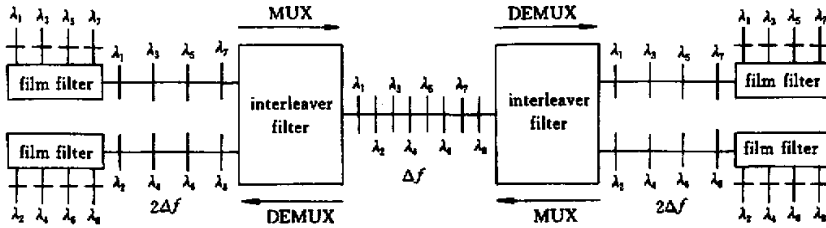


图6 Interleaver与薄膜滤波器混合结构的DWDM系统

Fig.6 A hybrid structure of interleaver and film filter applied in DWDM fiber system

DWDM 光纤通信系统的 100 GHz 的频率间隔压缩到 50 GHz, 系统的传输容量倍增。

参考文献

- 1 Hu Taiguang. Situation of WDM devices. *Optical Communication Technology* (光通信技术), 2000, 24(2): 79~84 (in Chinese)
- 2 A. K. Srivastava, Y. Sun, J. W. Sulhoff *et al.*. Signal

- power transients in optically amplified WDM ring networks. *Optical Fiber Communication Conference (OFC)*, 1998, 2:Paper PD10
- 3 W. H. Loh, F. Q. Zhou, J. J. Pan. Novel designs for sampled grating-based multiplexers-demultiplexers. *Opt. Lett.*, 1999, 24(21):1457~1459
- 4 Max Born, Emil Wolf. *Principles of Optics*. The 6th edition, Pergamon Press, 1980