

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0375-04

晶体型 Interleaver 器件的带宽优化设计*

柯昌剑¹ 刘德明¹ 黄德修¹ 张山丛² 吴 砺² 凌吉武²

(¹ 华中科技大学光电子工程系, 武汉 430074)
(² 福建华科光电有限公司研发中心)

摘要 随着密集波分复用技术的迅速发展, 系统中复用信道之间的间隔越来越小。交叉波长波分复用器 (Interleaver) 作为一种能够扩展信道间隔的全新器件, 很好的满足了系统升级的需要。介绍了晶体型 Interleaver 器件的基本工作原理, 同时应用傅里叶级数的方法对 Interleaver 输出光谱的带宽特性进行了讨论。实验结果显示, 经过优化设计后的器件, 其输出光谱带宽特性得到了明显改善。

关键词 交叉波长波分复用器, 密集波分复用, 带宽

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A

Optimization of Output Spectra Performance in Crystal Typed Interleaver

KE Chang-jian¹ LIU De-ming¹ HUANG De-xiu¹ ZHANG Shan-cong²
WU Li² LING Ji-wu²

(¹ Department of Optoelectronics Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074)
(² R&D Center, Fujian Casix, Inc.)

Abstract Nowadays the channel spacing of DWDM systems is becoming more and more dense to accommodate the exploded traffic demand. Interleaver, which separates the incoming spectra of the optical signals into two complementary sets of periodic spectra, could provide a solution for DWDM devices and systems. In this paper an interleaver based on crystal waveplate (Yttrium Vanadate) is introduced. The performance of the output spectra is optimizing by use of Fourier expansion. Experimental results give excellent agreements with the theoretical analysis.

Key words Interleaver, DWDM, bandwidth

1 引言

交叉波长波分复用器 (Interleaver) 是最近几年刚发展起来的一种新型器件。它可以将波分复用信号中的某一波长序列按交叉的顺序分离开来实现解复用功能, 或者将对应波长位置彼此错开的两个波长序列复用成间隔更小的新的波长序列。交叉波长波分复用器的出现使得器件和系统的设计与升级变得更加容易。根据工作原理的不同, Interleaver 可分为晶体型^[1]、干涉仪型^[2]和标准具型^[3]等三种类型。

2 理论分析与数值计算

晶体型 Interleaver 器件的核心部分可以等效为

一个晶体波片, 其工作原理是: 利用晶体中 o 光和 e 光折射率的不同来产生与波长相关的相位差 δ 。通过设计晶体的长度, 使得对于某些波长 (如偶数道 ITU 波长) 的光信号的晶体呈现半波片的特性, 而对于另外某些波长 (如奇数道 ITU 波长) 的光信号则呈现全波片的特性。这样入射到晶体上包含多个波长信号的线偏振光, 经过晶体以后就会含有两个相互正交的线偏振态, 它们分别对应于奇数道和偶数道的 ITU 波长, 如图 1 所示。通过偏振分光器件将两个偏振态分开, 就可以实现奇数道和偶数道波长的分离。

单级滤波的 Interleaver 输出光谱为一正弦或者余弦曲线。为了使器件输出光谱性能满足系统上使用的需要, 在晶体型 Interleaver 中可以通过多级具有不同相位差的晶体波片的串联, 来改善输出光谱

* 武汉市科委重大科技攻关计划资助课题。

的带宽特性。

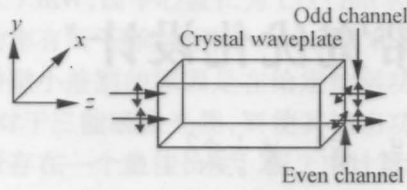


图1 晶体型 Interleaver 的结构示意图

Fig. 1 Schematic of crystal typed interleaver

带宽优化的数学机理是基于方波的傅里叶级数展开。一个周期性变化的方波可以用傅里叶级数的

方法展开成一系列具有不同周期的正弦(或余弦)函数的和。在表达式中谐波项越多,则输出光谱越趋近方波。考虑一个 Interleaver 器件的带宽优化设计时,首先可以根据实际应用中对带宽的具体需要,选择展开式中谐波的项数,即选择串联级次的数目。然后调节相关参数改变光强表达式中各次谐波对应的系数,从而实现输出光谱带宽特性的改善。下面主要分析两级晶体波片串联对输出光谱带宽特性的影响。

对第一级和第二级晶体波片而言,其琼斯矩阵可以写成^[4]

$$T_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 \\ \sin\theta_1 & -\cos\theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(-i\delta_1/2) & 0 \\ 0 & \exp(i\delta_1/2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 \\ \sin\theta_1 & -\cos\theta_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & \sin\theta_2 \\ \sin\theta_2 & -\cos\theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(-i\delta_2/2) & 0 \\ 0 & \exp(i\delta_2/2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & \sin\theta_2 \\ \sin\theta_2 & -\cos\theta_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,

$$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} |n_o - n_e| L_1, \quad \delta_2 = \frac{2\pi}{\lambda} |n_o - n_e| L_2,$$

分别为第一级和第二级晶体波片对应某一个特定波长 λ 所产生的相位差; θ_1 、 θ_2 分别为第一级和第二级晶体波片的光轴与 x 轴之间的夹角; L_1 和 L_2 为第一级晶体和第二级晶体的长度。

设入射线偏光的矩阵为 $E_{in} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$, 那么经过两级晶体串联后出射的矩阵可以写成

$$E_o = T_2 T_1 E_{in},$$

x 轴上透射光振幅与波长的关系满足

$$E_{ax} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}^T E_o = (s_1^2 c_2^2 - c_1 c_2 s_1 s_2) \exp[i(\delta_1 - \delta_2)/2] + (s_2^2 c_1^2 - c_1 c_2 s_1 s_2) \exp[-i(\delta_1 - \delta_2)/2] + (s_1^2 s_2^2 + c_1 c_2 s_1 s_2) \exp[i(\delta_1 + \delta_2)/2] + (c_1^2 c_2^2 + c_1 c_2 s_1 s_2) \exp[-i(\delta_1 + \delta_2)/2] \quad (3)$$

其中 s_1 、 s_2 、 c_1 、 c_2 分别代表 $\sin\theta_1$ 、 $\sin\theta_2$ 、 $\cos\theta_1$ 、 $\cos\theta_2$ 。

考虑到对应奇偶波长的不同偏振态应该具有相同的振幅,因此 $\theta_1 = 45^\circ$ 。此时 x 轴对应偏振态的输出光强可以写成

$$I_{ax} = |E_{ax}|^2 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} (c_2^2 - s_2^2)^2 \cos\delta_1 + \left(s_2^2 c_2^2 - \frac{1}{2} c_2 s_2 \right) \cos(\delta_1 - \delta_2) +$$

$$\left(s_2^2 c_2^2 + \frac{1}{2} s_2^2 c_2^2 \right) \cos(\delta_1 + \delta_2) \quad (4)$$

同样在 y 轴上透射光强也有类似(4)式的表达式。将(4)式和含有三次谐波的方波傅里叶级数展开式作比较发现,若 $\delta_2 = 2\delta_1$, 即第二级晶体长度为第一级的两倍时,光强的表达式中只含有基波项和三次谐波项,所以(4)式可以化简为

$$I_{ax} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} (1 - \sin 2\theta_2) \left(1 + \frac{1}{2} \sin 2\theta_2 \right) \cos\delta_1 + \frac{1}{4} \sin 2\theta_2 (1 + \sin 2\theta_2) \cos 3\delta_1 \quad (5)$$

由(5)式,通过改变第二级晶体波片与第一级晶体波片之间的夹角就能够有效地优化输出光谱的带宽特性。为了简便起见,我们采用归一化频率 ν 的形式来分析。归一化频率 ν 定义为

$$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} |n_o - n_e| L_1 = 2\pi\nu \quad (6)$$

图2给出了第二级晶体波片光轴与 x 轴的夹角 θ_2 为 -45° 、 -15° 和 45° 时的输出光谱曲线。从该组曲线可以得出:当 $\theta_2 = -15^\circ$ 时,器件的带宽特性发生了明显改善,这是因为第二级晶体波片的引入使得器件输出光谱对应表达式中同时含有基波项和三次谐波项的缘故。

图3为 θ_2 在 -45° 到 0° 范围内变化时,输出光谱归一化带宽(以 3 dB 带宽为基准)的理论计算曲线。和前述的分析一样,当 $\theta_2 = -15^\circ$ 时,器件的带宽特性最优。用傅里叶级数的观点很容易理解带宽

变化的原因:在两级晶体波片串联的情况中,随着夹角 θ_2 的改变,在特定的波长区域附近,光强随波长的变化率有可能会很缓慢。如果这个区域是在输出光谱的顶部通带内,那么器件的顶部通带带宽性能就会得到改善。具体来说,要使三次谐波项能够产生这种作用,其表达式中对应项的系数应为负值。所以当第二级晶体波片与 x 轴的夹角 θ_2 从 -90° 到 90° 之间变化时,只有在 -90° 到 0° 范围内,三次谐波项的系数为负数,带宽特性才能够得到改善。而在 0° 到 90° 范围内,三次谐波项的系数为正,此时随着角度的变化,三次谐波的作用越来越明显。当夹角 θ_2 为 45° 时,输出光谱的周期变为原来的三倍。

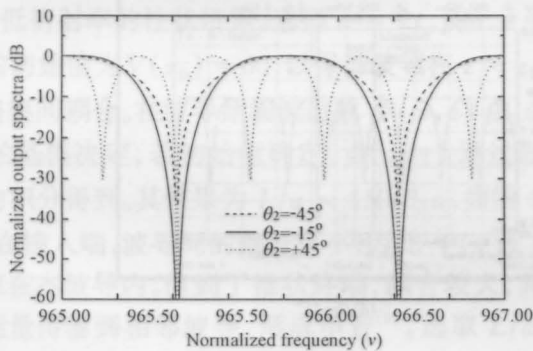


图2 输出光谱的理论计算曲线

Fig.2 Numerical analysis of the output spectra. θ_2 : angle between the optical axis of the second stage crystal waveplate and the x axis

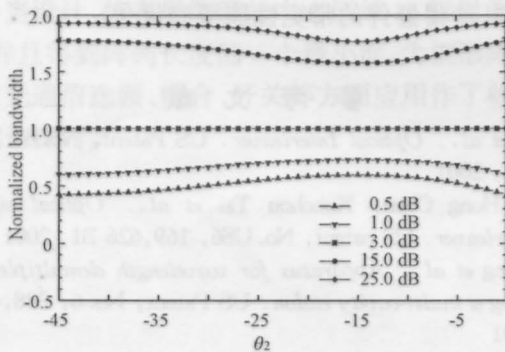


图3 输出光谱带宽的理论计算曲线

Fig.3 Numerical analysis of the output spectra bandwidth

根据三次谐波项系数的正负初步确定 θ_2 的范围后,可以通过计算在此范围内输出光谱曲线 3 dB 值处斜率的变化情况来确定带宽优化的最佳位置。图 4 给出了归一化频率 966.27 处输出光谱曲线斜率的变化情况。从该图中我们可以知道:在 -90° 到 0° 的范围内,当夹角为 -15° 和 -75° 时,斜率的绝对值出现最大值,此时带宽特性最优。而当夹角为

45° 时,斜率的绝对值虽然也会出现最大值,但是此时输出光强的表达式中基波项完全消失,仅存在三次谐波,这与前面的分析是一致的。

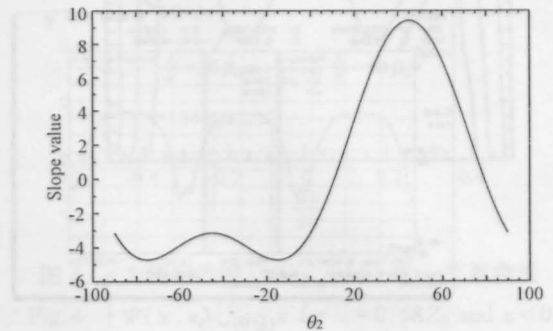


图4 输出光谱曲线在归一化频率 966.27 处斜率的变化情况

Fig.4 Slope value at the normalized frequency 966.27 (-3 dB) of the output

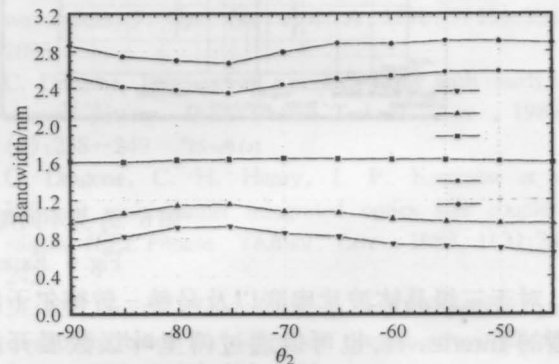


图5 θ_2 在 -90° 到 -45° 范围内变化时输出光谱带宽的实验曲线

Fig.5 Experimental output spectra bandwidth

3 实验现象分析与讨论

根据前面的理论分析和数值计算,我们对两级晶体串联的情况进行了实验研究。实验中使用的是自由光谱范围为 200 GHz 的 YVO_4 晶体波片^[5]。从图 5 可以知道,当 $\theta_2 = -75^\circ$ 时,输出光谱的带宽特性最佳。当 $\theta_2 = -15^\circ$ 时,也可以得到同样的结果。这个结果验证了理论分析中关于带宽特性最佳位置的判断。

图 6 给出了不同夹角时,输出光谱的变化情况。图 6(a)是 $\theta_2 = -75^\circ$ 时输出光谱的实验曲线,就每一个通带而言,此时曲线的顶部得到了展平,并且底部得到了压缩,带宽特性发生了明显的改善。图 6(b)对应的是只有基波项时的输出光谱曲线。此时曲线的带宽特性比较差。图 6(c)和图 6(d)给出了

θ_2 为正角时输出光谱的实验曲线。此时三次谐波项的系数为正数,相比于图 6(b),即只有基波项时的输出光谱曲线而言,第二级晶体的引入反而恶化

了器件输出光谱的带宽特性。特别是当 $\theta_2 = 45^\circ$ 时,输出光谱的周期变成了原来的三倍,这是我们所不希望的。

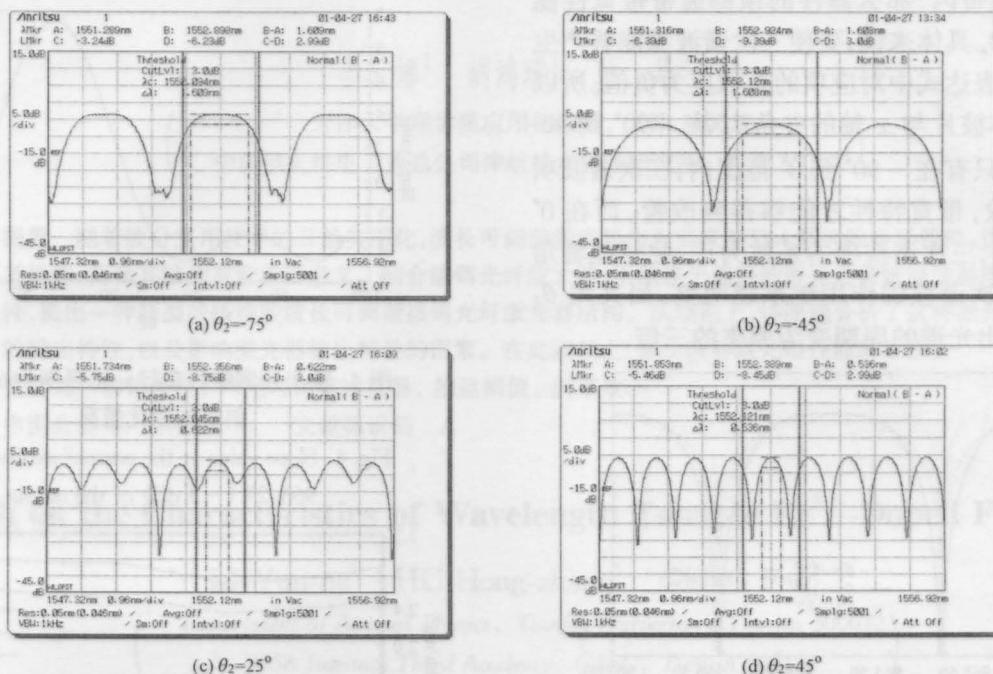


图 6 θ_2 为不同角度时,输出光谱的实验曲线

Fig. 6 Experimental output spectra

对于三级晶体波片串联以及马赫-曾德尔干涉仪型的 Interleaver,也可以通过傅里叶级数展开的方法来进行分析^[6]。通过对比马赫-曾德尔干涉仪和晶体波片的传输矩阵可以知道,两者对带宽进行优化的基本原理是一样的。即如果串联各级的臂长差满足一定的比例关系,那么光强随波长的表达式中就会出现高次谐波项。改变每一级中耦合器的耦合比,就可以实现谐波项前面系数的变化,从而实现通带带宽性能的改善。

4 结 论

本文应用傅里叶级数的方法对晶体型 Interleaver 设计中带宽优化的规律进行了讨论。理论计算和实验表明,当满足不同相位条件的多级晶体波片串联时,随着串联级次的增加,输出光谱的光

强表达式中将会出现高次谐波项。调节各级晶体光轴之间的夹角可以改变光强表达式中各次谐波对应的系数,使得器件的带宽性能得到优化。

参 考 文 献

- 1 Li et al.. *Optical Interleaver*. US Patent, No. 6, 215, 923, 2001
- 2 Jye-Hong Chen, Kuochou Tai et al.. *Optical signal Interleaver*. US patent, No. US6, 169,626 B1, 2001
- 3 Wong et al.. *Apparatus for wavelength demultiplexing using a multi-cavity etalon*. US Patent, No. 6, 208,444, 2001
- 4 梁铨廷. *物理光学*. 北京:机械工业出版社,1987
- 5 CASIX, Inc., *Yttrium Vanadate (YVO₄) Crystal*. Crystal Guide'99, 1999. 53
- 6 Charles H. Henry et al.. *Monolithic optical waveguide filters based on Fourier expansion*. US patent, No. 5, 596, 661, 1997