文章编号:1002-1582(2007)01-0150-03

体相位全息光栅式波分复用器的研究

张青峰^{1,2},朱永田¹

(1. 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所,南京 210042; 2. 中国科学院研究生院,北京 100049)
 摘 要:利用体相位全息光栅的优良特性,研制光栅式密集型波分复用器(DWDM)。准直后的信道波长通过体相位全息光栅两次衍射,在焦面上实现信道波长的分复用。阐述了体相位全息光栅的独特结构特点,给出了体相位全息光栅式密集型光波分复用器件的原理图,计算出各个信道的位置及间隔,用 Zemax 仿真出设计模型。相比于薄膜滤光片式器件而言,具有许多独特的优良特性,能够实现更密集更多信道数量的分复用。

关 键 词:光纤通信;密集型波分复用器件;体相位全息光栅;衍射 中图分类号:TN929.1;O438.1 **文献标识码**:A

Research of wavelength division multiplexing based on volume phase holographic grating

ZHANG Qing-feng^{1,2}, ZHU Yong-tian¹

 National Astronomical Observatory Nanjing Institute of Astronomical Optical and Technology, Chinese Academy of Science, Nanjing 210042, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract : Based on volume phase holographic grating 's quality character, a type of wavelength division multiplexing was developed. Collimated channel waves were diffracted by double passing a grating, then resulted in wavelength multiplexing on the collimated lens 's focal plan. The unique characteristic of the VPH grating and the principle figure of multiplexing device were introduced. Every channel 's position and interval were calculated. The device was designed by Zemax soft. Its characters were analyzed. Based on the thin film filter, the device has more unique advantages and can achieve denser and more channels.

Key words: optical fiber communication; dense wavelength division multiplexing (DWDM); volume phase holographic grating (VPHG); diffraction

0 引 言

随着光纤通信的发展,波分复用器(WDM)技术 广泛应用于超大容量系统、双向传输系统、全网络监 控、光纤故障断点位置判定、全光网络系统等。可以 预测随着全球光纤通信网络的高速发展,WDM 技 术会越来越扮演一个重要的角色。

DWDM 是一种分出波长密度相对较高的 WDM 多工分波器,可以分出 4、8、16、32 个或更多 的波长。当前光纤通信界中最常用最成熟的制作 DWDM 方式就是薄膜滤光片(Thin Film Filter, TFF)式,占到了当前市场份额中 90%以上。但由 于 TFF 技术受自身技术的局限^[11],在信道数量规格 上想进一步提升有很大的困难,当前就最高 100 GHz 也超不过 32 信道波长,很难有进一步发展 的余地。不过目前在一些国际大公司还兴起了另外 两种分波技术:光纤波导(Array Wave Guide, AWG)、以及光纤光栅(Fiber Bragg Grating,FBG)。 目前阿尔卡特(Alcatel)、朗讯(Lucent)所属的贝尔 实验室等已经推出了这两种 DWDM 产品^[2]。但这 两种技术的专利只被少数几个大公司所垄断,一般 企业介入需要支付很大的专利费用,所以成本相应 很高,再者这两种技术还不够成形,达到普及程度还 需要一定的技术推进和时间过程。

本文提出采用体相位全息光栅(VPHG)来实现 光波分复用技术。这种光栅结构独特紧凑,线密度 大,具有高空间分辨率,同时衍射效率也相对较高。 我们选择 VPHG来实现光波分复用,就是想利用其 优良特性,突破 TFF 技术的"瓶颈",制作更多路信 道的 DWDM 器件。

1 体相位全息光栅

VPHG的制作利用了光的干涉性原理:两束近 平行相干光在光学乳胶中形成干涉场,导致乳胶的 折射率发生周期性变化,其表现为一组明暗相间的 等间隔的平面族,形成平行干扰带,周期由这两束近

平行光的夹角和波长所确定,乳胶再经过漂白、干燥成型。制作 VPHG 的乳胶一般为重铬酸盐明胶 (Dichromated Gelatin, DCG)^[3],这种胶具有高衍射

效率、高澄清、低 散射、低吸收、长 寿命等特性。定型 后再前后两边用 镀有相应的 AR 低 反膜的平面玻璃 封装^[4]。结构如 图 1。



与一般的衍^{图1 典型体相位全息光栅结构图} 射光栅一样、VPHG满足经典光栅衍射方程

$$mf = n_1(\sin + \sin) \tag{1}$$

式中 f 为空间频率(线密度); n₁ 为封装玻璃折射 率; 为光栅入射角; 为衍射角; m 为衍射级数; 为波长。其衍射特性相似于 X 射线在晶体结构中 的衍射,衍射能量分布由布拉格衍射效应决定。在 光纤通信中一般采用光栅的一级衍射,即 m = 1。当 = 时,满足布拉格衍射条件^[5,7],光栅衍射效率

量 · 时,两定币拉恰们别亲件 · ,元愐们别双举 最高,衍射方程变为

$$f_{\rm B} = 2 n_1 \sin_{\rm B} \qquad (2)$$

式中 _{B、B}分别为布拉格衍射波长和布拉格衍射 角。

VPHG相比于其它类型光栅,最大的优点就是 衍射效率高^[4,5],理论值最高可以达到 100%,实际 可以达到 92%以上。对其一级衍射效率理论,可以 用科格尼克(Kolgelnik)耦合波理论近似方程精确分 析,这一理论已经在体全息领域得到了广泛地利用。 对于透射光栅,其衍射光两个偏振面的峰值衍射效 率可以评估为

$$_{\rm s} = \sin^2 \left[\frac{n_2 d}{\cos 2B} \right] \tag{3}$$

和

$$p = s \cos(-) \qquad (4)$$

式中 2B 为乳胶内的布拉格角; n_2 为乳胶折射率 变量; d 为乳胶厚度; s, p 分别为 s 偏振面, p 偏振 面的衍射效率。由上(3)、(4) 式可知, 设计光栅时适 当选择 n_2 、d的参数, 理论是可以达到最高值的。 同时只要 和 相差不是很大, s 偏振面跟 p 偏振面 的衍射效率就相差很小。在布拉格条件时,其衍射 光的两个偏振面峰值衍射效率几乎相等^[7],非常有 利于降低 DWDM 的偏振相关损耗(PDL)。如果两 封装镜片采用膨胀系数较小的材料, 如熔石英等, 能 够很好地抑制温漂效应, 有利于 DWDM 器件在不 同温度环境下正常工作。

2 体相位全息光栅式密集型波分复用器的 原理设计

如图 3. VPHG 式 DWDM 器件是由准直透镜、 VPHG、反 射 1.0 镜、透镜阵列 和固定在 V 型 🕯 槽上的单模光 1565 1535 1545 1555 Wavelength/nm 纤阵列构成。 当器件用作分 图 2 中心波长为 1545nm 的 9401/mm 用器件时,输 VPHG衍射效率图,其两偏振面 入端位于准直 的衍射效率相差无几 透镜焦点处, 多波长的光 准直透镜 VPHG 信号通过透 镜准直后、 以中心波长 ᄮ ᄮ _B的布拉格 衍射角 В 进入 VPHG 图 3 体相位全息光栅式 光栅,多波 DWDM 器件的原理图

色散。据布拉格衍射条件,中心波长衍射角等同于入射角 $_{B}$,其它波长衍射角与 $_{B}$ 相差相应一个对应小量。于中心波长 $_{B}$ 为对称中心向上或向下数, 第 n波长($_{B} + n$)的衍射角为 $_{n} = (_{B} +)_{n}$,则据方程(1)有

长发生衍射

$$f(_{\rm B} + n) = n_1 [\sin_{\rm B} + \sin(_{\rm B} + _n)]$$
$$n = \pm 1, \ \pm 2, \ \pm 3, \dots$$
(5)

式中 为 DWDM 器件信通波长间隔;这里规定大 于 _B的信通波长, *n*、 取正,否则取负。为计算方 便,以下计算时 *n*、 均取正数。 _n为第 *n* 波长衍 射角与 _B的偏差,也只取正值。把方程(4)代入方 程(5),化简后得到

$$\frac{nt}{n_1} + \sin B = \sin(B + n) \tag{6}$$

把方程(6)的左边按泰勒展式展开,并只取展式的前 三项

$$\sin(B + n) = \sin B + \cos B n - \frac{\sin B^2}{2}$$
(7)
代入方程(6)并整理得到

(sin _B/2)² _n - cos _B _n + nf / n₁ = 0 (8) 上式方程有解,但据分析,方程中正项解不适合实际,这样我们得到了第 n 个信道经 VPHG衍射后的 角色散偏量

$$_{n} = \operatorname{ctg}_{B} - \sqrt{\operatorname{ctg}^{2}_{B} - 4 \frac{n}{B}}$$
 (9)

衍射光波经过反射镜后再次通过 VPHG 光栅二次 衍射,据几何光学原理可以推算出,角色散量近似为 原来的两倍,即为2 "。经焦距为 F的准直透镜聚 焦后,形成各信道波长的焦面图。第 n 波长的焦面 与中心光轴的纵向高度为 y_n

$$y_n = 2F$$
 $_n = 2F$ $ctg_B - \sqrt{ctg_B^2 - 4\frac{n}{B}}$ (10)
焦面上相临两信道高低间隔为

 $y_{n,n-1} = y_n - y_{n-1}$ $= 2 F \left[\sqrt{\operatorname{ctg}^2_B - 4 \frac{(n-1)}{B}} - \sqrt{\operatorname{ctg}^2_B - 4 \frac{n}{B}} \right]$ (11)

据对称性,同理n、 取负数时, y_n 、 $y_{n,n-1}$ 相应中 心光轴可取负值求出。

由上可知,各信道焦面并不是完全等距地并排 在一垂直平面上,同时由于像差的影响,在横向方向 也不是完全等距的,而是在一个曲平面上。下面看 看具体例子的设计情况:

(1) 100 GHz (0.8nm) 中心波长为 1550nm 的
 DWDM 器件,采用熔石英封装的 1200 l/mmVPHG
 光栅,准直透镜焦距 F=75mm。

| 表 1 100 GHzD WDM64 信 道 分 币 参 数 | | | | |
|--------------------------------|------------|--------------------|--------------------|--|
| 参数 <u>n</u> 信道 | "/ rad | y _n /µm | $y_{n, n-1}/\mu m$ | |
| 1 | 0.00086949 | 130.42 | 130.42 | |
| 15 | 0.01310999 | 1966.50 | 131.78 | |
| 16 | 0.01398855 | 2098.28 | | |
| 31 | 0.02725723 | 4088.58 | 133.49 | |
| 32 | 0.02814716 | 4222.07 | | |
| 表 2 50 GHzDWDM64 信道分布参数 | | | | |
| | | | | |

| 参数 _n 信道 | "/ rad | y_n/μ_m | $y_{n, n-1}/\mu m$ |
|-------------|------------|-------------|--------------------|
| 1 | 0.00043467 | 130.40 | 130.40 |
| 15 | 0.00652680 | 1961.04 | 101.10 |
| 16 | 0.00697387 | 2092.16 | 131.12 |
| 31 | 0.01354951 | 4064.85 | |
| 32 | 0.01398919 | 4196.76 | 131.91 |

(2) 50 GHz (0. 4nm) 中心波长为 1550nm 的
 DWDM 器件,采用熔石英封装的 1200 l/ mmVPHG
 光栅,准直透镜焦距 F = 150mm。



各信道衍射点阵图

数仅取决于信道间隔,也即是固定在 V 型槽上光纤 阵列的排布制作。在每根光纤前端都设计有一个微 透镜,使得准直平行入射到光纤内的光为 0.8nm (或 0.4nm)带宽,安装时可微调微透镜的前后距离以弥 补各信道的横向差距。这种微透镜的前后距离以弥 补各信道的横向差距。这种微透镜的口径不能大于 信道间隔,确定好信道间隔后可以一次性加工做成微 透镜阵,由于制作技术直工艺的改进和提高,制作这 种微透镜阵技术已经成熟,例如可采用注塑压膜的技 术。由于一般单模光纤的包层直径为 125µm ±2µm, V 型槽可制成节距为 128µm,精度为 0.2µm^[1]。用 Zemax 模拟设计,从成像的点阵图也可以看出,各信 道可以彼此清晰分开,足可用于光纤阵列的排布。

3 结 论

本文通过阐述 VPHG的特点 .分析了 VPHG式 DWDM 器件的原理及具体元件结构,给出了各信道 间距计算公式,证明了 VPHG式 DWDM 器件的多 信道的可行性。相比于薄膜滤光片式 DWDM 器件 而言, VPHG 式器件的偏振相关损耗更低; VPHG 的布拉格衍射效率相对较高,使得器件的插入损耗 相对较低:VPHG式器件能够工作的频谱很宽.覆 盖了光纤通信的 C、S、L 全波段,还可以延伸到可见 光范围: VPHG的高色散性有利于制作 100 GHz、 50 GHZ的 DWDM 器件,通道数可以达到 128 路;光 纤阵列、V 型槽、微透镜阵列、准直透镜、VPHG 光 栅一并可以安装在石英衬底上固定^[8].可使器件紧 凑,整个器件的封装长度不会超过18cm;同时此器 件具有良好的温度特性,能够工作在 - 10 ~ 80 环境下。本课题下一步的难点就是微透镜阵列和光 纤阵列的安装定位了,要求精度较高,这也是决定器 件成败的关键。

参考文献:

- [1] 李学煌,等. 光无源器件[M]. 北京:人民邮电出版社,1998.
 125 → 37.
- [2] 通信世界网. 光网络技术的关键-DWDM [EB/OL]. http: www.cww.net.cn/ Technique/ 2003/ 8/ 4258.htm.
- [3] 王之江.光学技术手册[M].北京:机械工业出版社,1987.314— 315.
- [4] Barden S, Arns J, Colburn B. Volume-phase holographic grating and their potential for astronomical applications [J]. SPIE, 1998, 3355:866-876.
- [5] Barden S C, Arns J A, et al. Volume-phase holographic gratings and the efficiency of three simple VPH grating [J]. The Publications of Astronomical Society of the Pacific ,2000,112: 809-820.
- [6] Le R D. Volume Diffraction Gratings for Wavelength Division Multiplexing [EB/ OL]. http://www.wasatchphotonics.com/ documents[®] %20word, %20pdf/ gratingtutorial.pdf.
- [7] Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings[J]. Bell Systems Technology Journal ,1969 ,48 :2909 –2947.
- [8] 黄章勇.光电子器件和组件[M].北京:北京邮电大学出版社, 2001.240-245.