

# 基于阵列波导光栅的单纤三重波分复用器\*

郎婷婷<sup>1</sup> 何建军<sup>1,2,†</sup> 何赛灵<sup>1</sup>

(1 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 光及电磁波研究中心, 杭州 310058)

(2 Lightip Technologies Inc, Ottawa K1 K4R8, Canada)

**摘要:** 利用阵列波导光栅实现单纤三重波分复用器是一种具有很多优点的方法. ITU G. 983 标准规定了无源光网络的三个波长为 1310, 1490 和 1550nm. 由于这三个波长的间距相差很大, 光谱范围也大, 用普通的 AWG 设计方法不能达到理想的效果. 文中提出了一种基于阵列波导光栅的单纤三重波分复用器的新型设计, 利用衍射光栅的频谱周期性, 使离第二、三波长较远的第一波长工作在不同的衍射级次, 并将第一波长映射到与第二、三波长形成几乎等间距信道的第四波长, 从而减小了对光栅自由光谱范围的要求, 同时使对应这三个工作信道的输入/输出波导几乎等间距, 解决了传统设计方法导致的衍射级次小、器件尺寸大、制作困难等问题.

**关键词:** 集成光学; 单纤三重波分复用器; 阵列波导光栅; 自由光谱范围

EEACC: 4140

中图分类号: TN256

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)02-0368-05

## 1 引言

随着通信容量的急剧增加, 现有光纤网络的传输容量日趋饱和, 波分复用技术(WDM)是解决这一问题的有效方法. 密集波分复用技术(DWDM)已经在远距离网络中发挥重要作用, 而在城域网中, 粗波分复用技术(CWDM)也已得到广泛应用. 与密集波分复用相比, CWDM 具有无需严格要求波长精度和参数控制、无需热电冷却器、无需补偿偏振色散和温度影响等优点<sup>[1]</sup>.

另外, 在接入网中, 光纤到户(fiber to the home, FTTH)在近年得到迅速发展, 将成为新一代宽带网络的标志. Triplexer<sup>[2]</sup>是一个单纤三重波分复用器, 用于将一根光纤里的两个输入光信号分别耦合到一个数字信号接收器和一个模拟信号接收器, 同时将一个数字信号发射器发射的光信号耦合到同一根光纤, 是 FTTH 系统必需的一种基本元器件. 根据 ITU G. 983 标准的规定, 无源光网络(passive optical network, PON)用户终端接收的数字信号波长在 1490nm, 模拟信号波长在 1550nm, 而发射的数字信号的波长在 1310nm.

图 1 是 Triplexer 在双向通信系统中应用的一个示意框图. 由 Triplexer1 和数字信号发射器、数字信号接收器、模拟信号接收器作为系统的一端, 由 Triplexer2 和数字信号接收器、数字信号发射器、模

拟信号发射器构成系统的另一端. 系统两端由光纤连接, 即可实现双向通信.

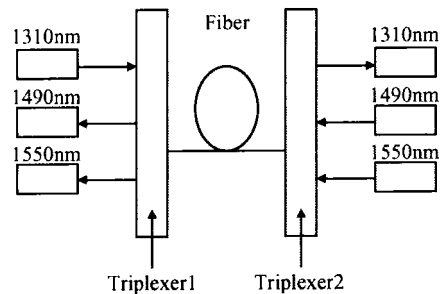


图 1 Triplexer 在双向传输系统中的应用框图

Fig. 1 Triplexer's application in bidirectional system

有很多方法和结构可以实现 Triplexer 这一模块, 如马赫-曾德仪、薄膜滤波片<sup>[3]</sup>(thin film filter, TFF)等, 其中基于薄膜滤波片的 Triplexer 已经实现商用. 但是薄膜滤波片具有一些固有缺点, 如需要劳动密度高的手工组装, 以及器件的可靠性差<sup>[4]</sup>.

利用光栅波分复用技术实现 Triplexer, 与薄膜滤波片技术相比具有体积小、集成度高、性能稳定可靠等优点<sup>[5]</sup>. 其实现的主要困难在于, 较大的波长间隔造成衍射级次过小, 器件尺寸过大等. 以阵列波导光栅(arrayed waveguide grating, AWG)作衍射光栅为例, 当 AWG 的衍射级次小于 8 时, 就很难实现简单的由三段直波导、两段弯曲波导构成的阵列波导. 因为小的衍射级次直接导致阵列波导之间的长

\*浙江省科技厅(批准号:2004C31095)和杭州市科技局科技创新(批准号:20051321B14)资助项目

† 通信作者. Email:jj.he@lightip.com

2005-08-30 收到, 2005-11-07 定稿

度差小,使用一般设计将使阵列波导之间无法互相分开.文献[4]中提出,可用五段直波导、四段弯曲波导的阵列波导结构来实现小衍射级次的 AWG.文献[5,6]中提出,阵列波导使用 S 形的设计.但是很明显,这样都会造成器件过大,制作困难.

本文提出了一种新的实现方法.利用衍射光栅的频谱周期性,使离第二波长(1490nm)和第三波长(1550nm)较远的第一波长(1310nm)工作在不同的衍射级次,并将第一波长映射到接近第二、三波长中间点的第四波长,使得衍射光栅的自由光谱范围只需要包含第二、三、四波长的总光谱范围,而该自由光谱范围大大小于包括第一、二、三波长的总光谱范围.这样就减小了对光栅自由光谱范围的要求,同时使对应这三个工作信道的输入/输出波导几乎等间距,解决了传统的基于光栅波分复用技术的单纤三重波分复用器存在的器件尺寸大、衍射级次小、制作困难的问题.

## 2 基本原理

下面以一个阵列波导光栅<sup>[7,8]</sup>为例来具体说明本文提出的 Triplexer 设计基本原理. AWG 的基本结构如图 2 所示.我们知道阵列波导光栅需满足如下衍射方程:

$$n_{FPR} d_a \sin i + n_{FPR} d_a \sin o + n_a L = m \quad (1)$$

其中  $i = id_i / L_f$ ;  $o = jd_o / L_f$ ;  $n_{FPR}$  和  $n_a$  分别是自由传输区(free propagation region, FPR)和阵列波导的有效折射率;  $i$  和  $o$  分别是第一个和第二个 FPR 的衍射角;  $d_a$  是阵列波导的间隔;  $L$  是阵列波导间的长度差;  $m$  是衍射级次;  $\lambda$  是入射波长;  $i$  和  $j$  分别代表第几根输入和输出波导;  $d_j$  和  $d_o$  分别是输入和输出波导间隔;  $L_f$  是 FPR 的长度.

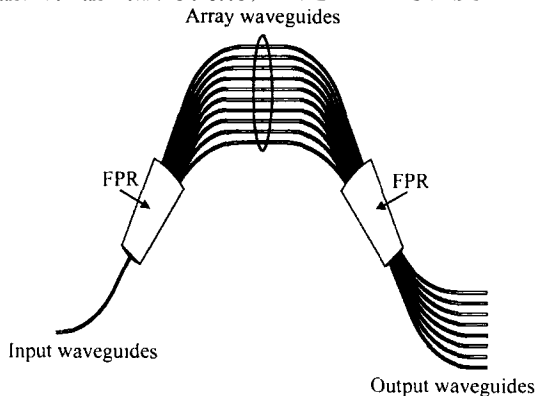


图 2 AWG 结构示意图  
Fig. 2 Schematic illustration of AWG

AWG 具有频谱的周期性,若  $\lambda$  的第  $m$  阶衍射级位置和  $\lambda + \lambda_{FSR}$  的第  $m - 1$  阶衍射级位置重合,则

为自由光谱范围(free spectral range, FSR),记做  $\lambda_{FSR}$ .图 3 给出三个信道 a, b, c 的光谱响应示意图,每个信道有多个响应波长,对应第  $m + 1$  阶、第  $m$  阶和第  $m - 1$  阶等衍射级次,相邻两个响应波长的间隔为 FSR.它由下式近似给出:

$$\lambda_{FSR} = \frac{\lambda}{m} \quad (2)$$

因此,对于给定的衍射角,有多个输入波长满足方程(1)的条件,对应不同的衍射级次,它们会在成像面上聚焦于同一位置.

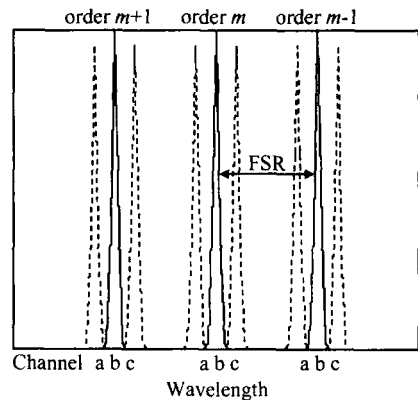


图 3 自由光谱范围示意图  
Fig. 3 Schematic illustration of FSR

如果按通常的 AWG 来设计用于 Triplexer 的 AWG,所有波长都处于同一衍射级次,那么由于三个信道的波长总覆盖范围很大,自由光谱范围至少需要大于 240nm,以使得各个波长都处在单个自由光谱范围之内,这样衍射级次就要很小( $< 6$ ),从而造成阵列波导之间的长度差小,难以用常用的阵列波导结构设计实现 AWG,器件的尺寸也就相应较大.

但是,如果利用 AWG 的频谱周期性,使第一波长(1310nm)工作在不同的衍射级次,并将这一波长映射到接近第二波长(1490nm)和第三波长(1550nm)中间点的第四波长,就可以减小对自由光谱范围的要求,同时将衍射级次提高到 10 以上,从而便于用简单的由三段直波导、两段弯曲波导构成的阵列波导结构实现 AWG.

## 3 基本设计步骤

首先,根据 ITU G. 983 标准,确定第一、二、三波长  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ,分别为 1310, 1490 和 1550nm.

本文所采用的波导结构为掩埋型方形波导,包层折射率用  $n_c$  表示,芯层为  $6\mu\text{m} \times 6\mu\text{m}$  的正方形,折射率用  $n_r$  表示.自由传输区、阵列波导区域的有效折射率分别用  $n_{FPR}$  和  $n_a$  表示.假设包层和芯层

的折射率随波长呈线性变化,可得到各个波长下的折射率,如表 1 所示,其中 632.8 和 1547.0nm 下的  $n_c$  和  $n_r$  是使用棱镜耦合仪在实验室中测得,而 1524.2nm 是根据后面计算得到的第四波长,同时也是本文设计得到的 AWG 的中心波长.

表 1 各个不同波长下的折射率

Wavelength/ nm	632.8	1547.0	1310.0	1490.0	1550.0	1524.2
$n_c$	1.4595	1.4470	1.4502	1.4478	1.4470	1.4473
$n_r$	1.4735	1.4610	1.4642	1.4618	1.4610	1.4613
$n_{FPR}$	1.4728	1.4582	1.4620	1.4591	1.4582	1.4585
$n_a$	1.4721	1.4554	1.4597	1.4565	1.4554	1.4558

并且根据以上阵列波导区域的有效折射率得到  $\frac{dn_a}{d} = -0.0183\mu\text{m}^{-1}$ .

接着,根据第一波长  $\lambda_1$  和第四波长  $\lambda_4$  均从中心输入波导输入,并从中心输出波导输出.我们知道对应这两个波长的衍射角  $\theta_1$  和  $\theta_4$  为 0,于是以下两个式子必须同时满足:

$$n_a(\lambda_1) L = (m + n) \lambda_1 \quad (3)$$

$$n_a(\lambda_4) L = m \lambda_4 \quad (4)$$

其中  $n_a(\lambda_1)$  已知,  $n_a(\lambda_4) = n_a(\lambda_1) + \frac{dn_a}{d}(\lambda_4 - \lambda_1)$ ,  $\lambda_4$  接近 1520nm,所以在保证自由光谱范围包含第二~四波长的情况下自由选择  $n$  后,就可以得到  $m_2 \sim m_4$  的衍射级次  $m$  和  $m_1$  的衍射级次  $m + n$ .

当选择比较大的  $n$  时,衍射级次  $m$  同时变大,此时 AWG 的阵列波导区域的结构设计相应简单,因此在 FSR 允许的情况下,应尽量选择较大的  $n$ . 本文选择  $n = 2$ . 另外,选定  $n$  后,  $m$  的取值也可适当调整,例如本文中,若  $m = 13$ ,则  $\lambda_4 = 1507.8\text{nm}$ ; 若  $m = 12$ ,则  $\lambda_4 = 1524.2\text{nm}$ . 本文我们选择离 1520nm 最接近的第四波长,所以最后得到  $n = 2$ ,  $m = 12$ ,  $\lambda_4 = 1524.2\text{nm}$ . 可以看出相较于通常设计,衍射级次提高了两倍.同时,对应于  $n = 1$ ,  $m = 12$  的波长为 1417.3nm,并且该波长是在 AWG 的工作频谱范围(第二、三、四波长的总光谱范围)之外,所以该波长对我们设计的 AWG 的工作没有影响.

接着,根据第四波长  $\lambda_4$  的光栅衍射方程,确定阵列波导间的长度差  $L = m \lambda_4 / n_a(\lambda_4)$ . 可以看出由于  $m$  的提高,  $L$  也同样得到了提高.在本文中,可计算得到  $L = 12.564\mu\text{m}$ , FSR = 134.55nm,同时包含第二~四波长的总光谱范围为 80nm(包括考虑每个信道 20nm 的通带宽度).可以看出 FSR 满足大于包含第二~四波长的总光谱范围的条件.

完成以上步骤后,就能保证第一波长和第四波长有相同的传播路径.在后面的步骤中,就无需考虑第一波长  $\lambda_1$ ,只需要根据第二~四波长和它们所在的衍射级次  $m$ ,按常用方法继续完成余下的 AWG 的设计.

由于中心波长 1524.2nm 并不在另外两个波长信道 1490.0 和 1550.0nm 的中央,所以分别对应于这两个波长信道的输出波导之间的间距并不完全相等.同时根据串扰大于 -40dB 的要求,确定输出波导的间距大于  $18\mu\text{m}$ .

首先设定 1550nm 波长信道的输出波导间距为  $d_{o1} = 18\mu\text{m}$ ,与中心波长 1524.2nm 的波长间隔为  $\lambda_{ch1} = 25.8\text{nm}$ ,根据所满足的衍射方程(1),可以得到自由传输区的长度  $L_f = 710\mu\text{m}$ .

接着,1490nm 波长信道与中心波长 1524.2nm 的波长间隔为  $\lambda_{ch1} = 34.2\text{nm}$ ,同样根据所满足的衍射方程(1),可以得到相应输出波导的间距  $d_{o2} = 24\mu\text{m}$ .

最后设计得到的 AWG 的各项参数如表 2 所示.整个 AWG 如图 4 所示,大小为  $17.032\text{mm} \times 1.711\text{mm}$ .图 5 为输出波导部分的放大图,图中还标出了各个输出波导所对应的波长信道.

表 2 AWG 的设计参数

Diffraction order of 1490.0,1524.2 and 1550.0nm	12
Diffraction order of 1310.0nm	14
Central wavelength/ nm	1524.2
Spacing of output waveguides for 1490.0nm/ $\mu\text{m}$	24
Spacing of output waveguides for 1550.0nm/ $\mu\text{m}$	18
Spacing of array waveguides/ $\mu\text{m}$	8.5
Length of FPR/ $\mu\text{m}$	710
Length difference between array waveguides/ $\mu\text{m}$	12.564
Number of array waveguides	23
Minimal bending radius/ $\mu\text{m}$	5000

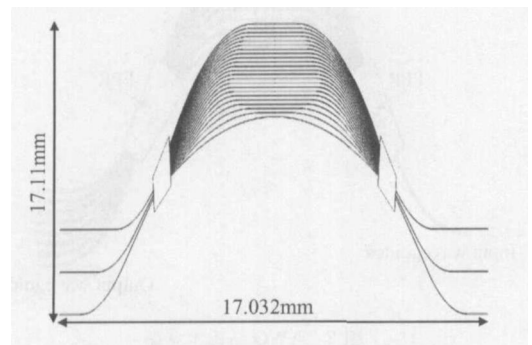


图 4 设计得到的 AWG 的结构  
Fig.4 Layout of designed AWG

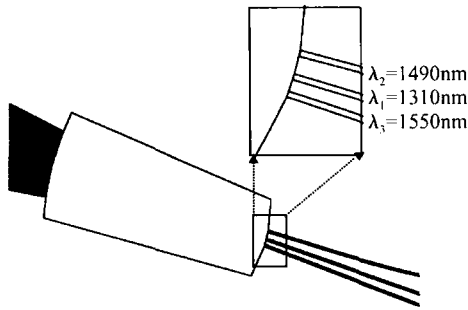


图 5 输出波导放大图及对应信道波长

Fig.5 Expanded view of the output waveguides and the corresponding channel wavelengths

### 4 数值计算结果与讨论

通过有效折射率方法,把三维结构等效为二维结构后,使用二维光束传播方法 (beam propagation method, BPM) [9] 结合完美边界条件 (perfect matched layer, PML) [10],对以上的设计结果进行模拟,如图 6 所示.

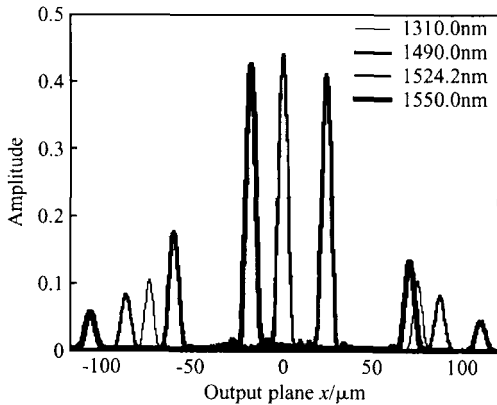


图 6 用于实现 Triplexer 的 AWG 的模拟结果

Fig.6 Simulation result of AWG for Triplexer

根据模拟结果,可以得到 1490.0 和 1550.0nm 的波长信道的最大振幅分别出现在输出平面的  $x = 24.0\mu\text{m}$  和  $x = -18.0\mu\text{m}$  处.这个结果与设计中的输出波导位置一致.另外还可以看出,第一波长和第四波长在成像面中心位置很好地重合,说明我们准确地将第一波长映射到了第四波长,并且可以看出对应这三个工作信道的输入/输出波导几乎等间距.

同样,根据模拟结果,可以得到如表 3 所示的耦合能量的值,其中输入能量已做归一化处理.模拟得出的 AWG 插入损耗为 0.93dB,损耗非均匀性为 0.41dB.

表 3 模拟得到的耦合能量

Table 3 Simulated coupling power

Wavelength/nm	1310	1490	1524.2	1550
Power coupled to AWG/dB	-0.46	-0.29	-0.26	-0.23
Output power/dB	-0.93	-1.15	-0.52	-0.74

本文的设计方法,不仅适用于 AWG,同样也可以用于具有频谱周期性的任何光栅,例如蚀刻衍射光栅 (EDG),通过衍射级次的提高,增大了 EDG 光栅齿面的尺寸,使得制作更加方便.另外,除了将第一波长映射到第二、三波长中间点外,同样也可以将第一波长映射到在第二、三波长以外的短波波长方向或者长波波长方向的第四波长.

### 5 结论

本文提出了一种基于阵列波导光栅的单纤三重波分复用器的新型设计,给出了具体的设计步骤,得到了用于实现 Triplexer 的 AWG 的最后设计结果,其衍射级次比通常设计提高了两倍,并且模拟结果也较理想.同时这种方法也适用于具有频谱周期性的任何光栅,对于各个工作信道的波长间距相差很大、光谱范围也较大的情况,和常用方法相比,有效地降低了对自由光谱范围的要求,提高了衍射级次.

### 参考文献

[ 1 ] Leo C J, Ramana P V, Sudharsanam K. Design of polymer arrayed waveguide gratings for access networks and CWDM applications. 2003 5th Conference on Electronics Packaging Technology, 2003 :647

[ 2 ] Li Xun, Zhou Guirong, Feng Ningning, et al. A novel planar waveguide wavelength demultiplexer design for integrated optical triplexer transceiver. IEEE Photonics Technol Lett, 2005, 17(6) :1214

[ 3 ] Yanagisawa Y, Inoue Y, Ishii M, et al. Low-loss and compact TFF-embedded silica-waveguide WDM filter for video distribution services in FTTH systems. OFC 2004, Los Angeles, CA, 2004 :TuI4

[ 4 ] Doerr C R, Cappuzzo M, Gomez L, et al. Planar lightwave circuit eight-channel CWDM multiplexer with < 3.9-dB insertion loss. J Lightwave Technol, 2005, 23(1) :62

[ 5 ] Liu Qing, Ma Weidong, Wang Wenmin, et al. The research of coarse wavelength division multiplexer based on array waveguide grating with broadened pass band and low crosstalk. Acta Optica Sinica, 2004, 24(9) :1265 (in Chinese) [刘青, 马卫东, 王文敏, 等. 一种通带平坦的粗波分复用/解复用器件的研制. 光学学报, 2004, 24(9) :1265]

[ 6 ] Adar R, Henry C H, Dragone C, et al. Broad-band array multiplexers made with silica waveguides on silicon. J Lightwave Technol, 1993, 11(2) :212

[ 7 ] Smit M K, Van Dam C. Phasor-based WDM-devices : principles, design and applications. IEEE J Sel Topics Quantum E-

- lectron, 1996, 2(2) :236
- [ 8 ] Takahashi H, Oda K, Toba H, et al. Transmission characteristics of arrayed waveguide N × N wavelength multiplexer. *J Lightwave Technol*, 1995, 13(3) :447
- [ 9 ] Zhou Qincun, Dai Daoxin, He Sailing. Simulation of arrayed waveguides gratings using a finite difference beam propagation method. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2002, 23(12) :1314 (in Chinese) [周勤存, 戴道锌, 何赛灵. 基于 FD-BPM 方法的阵列波导光栅模拟. *半导体学报*, 2002, 23(12) : 1314]
- [10] Lin Qingchun, Xiao Yueyu, He Sailing. PML boundary treatment method based on wide-angle finite-difference beam propagation method. *Acta Photonic Sinica*, 2002, 31(03) : 349 (in Chinese) [林青春, 肖悦娱, 何赛灵. 基于广角 FD-BPM 的 PML 边界处理方法. *光子学报*, 2002, 31(03) :349]

## A Novel Triplexer Design Based on Arrayed Waveguide Grating<sup>\*</sup>

Lang Tingting<sup>1</sup>, He Jianjun<sup>1,2,†</sup>, and He Sailing<sup>1</sup>

(1 Center for Optical and Electromagnetic Research, State Key Laboratory for Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)  
(2 Lightip Technologies Inc., Ottawa K1 K4 R8, Canada)

**Abstract :** An arrayed waveguide grating (AWG) based triplexer has many advantages including small size and low cost. The commonly used wavelengths in passive optical network (PON) are 1310nm, 1490nm and 1550nm, according to ITU G. 983 standard. Because of the wide spectral range and very unequal channel spacings, a conventional AWG design cannot produce a satisfactory result. In this paper, a novel triplexer design based on AWG is presented. The spectral periodicity of the grating is utilized in the design so that the first wavelength works at a different diffraction order, and it is mapped to a wavelength that is approximately in the middle of the second and third wavelength channels. This results in a reduced free spectral range (FSR) requirement and almost equal distances between the input/output waveguides. Consequently, the AWG can operate at a higher diffraction order with a smaller device size, compared to the one designed by conventional methods.

**Key words :** integrated optics; triplexer; arrayed waveguide grating; free spectral range

**EEACC :** 4140

**Article ID :** 0253-4177(2006)02-0368-05

<sup>\*</sup> Project supported by the Science and Technology Bureau of Zhejiang Province (No. 2004C31095) and the Key Program of the Science and Technology Bureau of Hangzhou (No. 20051321B14)

<sup>†</sup> Corresponding author. Email :jj.he@lightip.com

Received 30 August 2005, revised manuscript received 7 November 2005