

文章编号: 0258-7025(2008)01-0082-05

# 一种应用于波分复用无源光网络系统中的 滤波片-PIN-TIA 阵列光接收组件

李 蔚<sup>1</sup> 陈 龙<sup>2</sup> 黄德修<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 武汉光电国家实验室, 华中科技大学光电科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)  
<sup>2</sup> 武汉光讯科技股份有限公司, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 设计并实现了一种将密集波分复用(DWDM)薄膜滤波片与光电探测器 PIN 以及前置放大器 TIA 集成封装的光接收组件。通过创新设计单模光纤双芯插针和自聚焦透镜的结构,解决了透过密集波分复用滤波片后的反射光偏离轴线带来的耦合问题。并基于该组件实现了 32 个密集波分复用通道的解复用与信号检测同时完成的波分复用无源光网络(WDM-PON)系统中上行信道阵列接收模块。测试表明模块满足国际电信联盟(ITU-T)中心波长,最小插入损耗为 0.3 dB,最大插入损耗为 6 dB,响应速率为 100 Mbit/s~1.25 Gbit/s。

**关键词** 光通信;波分复用无源光网络;集成光电子组件;阵列光接收模块;密集波分复用滤波片-PIN-TIA 组件;自聚焦透镜

中图分类号 TN 929.11 文献标识码 A

## Design and Implementation of an Array Optical Receiver Device of Density Wavelength-Division Multiplexing-PIN-TIA for Wavelength-Division Multiplexing Passive Optical Networks

Li Wei<sup>1</sup> Chen Long<sup>2</sup> Huang Dexiu<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Wuhan National Laboratory of Optoelectronics/School of Optoelectronics Science and Engineering,  
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)  
<sup>2</sup>ACCELINK Technology Co., Ltd. of Wuhan Research Institute of MPT, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract** A kind of density wavelength-division multiplexing (DWDM) filter and PIN-TIA integrated optoelectrical device for upstream channels detection in wavelength-division multiplexing passive optical networks (WDM-PON) system is proposed. In order to achieve a parallel reflection beam for an efficient coupling and collimation to PIN-TIA, a novel structure design of a double single mode fiber core and self-focus lens is presented. Based on this device, a 32 channels array optical receiver module which can realize the demux and receiver performance in WDM-PON system is achieved. Through experiment, the responding bandwidth is from 100 Mbit/s to 1.25 Gbit/s, and the channel loss is from 0.3 dB to 6 dB.

**Key words** optical communication; wavelength-division multiplexing passive optical network; integrated optoelectrical device; array receiver module; density wavelength-division multiplexing filter-PIN-TIA; self-focus lens

### 1 引 言

在光纤接入网中,波分复用无源光网络(WDM-PON)因为可以给每个用户提供巨大的带宽,并且不会产生上行信道任何冲突,技术简单而受到人们

的青睐,是一个很有前途的光纤到户通信技术(FTTH)。但是需采用低成本光电子器件<sup>[1]</sup>来满足接入网的需要,尚处于研究开发阶段<sup>[2]</sup>,距离商用产品还比较遥远。本文立足于目前现有的技术,采用

收稿日期:2007-06-12;收到修改稿日期:2007-09-05

基金项目:国家 863 计划(2003AA312060,2006AA03Z422)资助项目。

作者简介:李 蔚(1968—),女,湖北人,副教授,博士,主要从事光通信系统与光电子器件方面的研究。

E-mail: weilee@hust.edu.cn

混合集成封装技术,分别独立制作 PIN 管芯和 TIA 芯片以及密集波分复用(DWDM)滤波片,通过优化各个分立器件之间的结构设计构成一个完整的功能器件,实现小型化、多功能和低成本、低功耗的波分复用无源光网络系统中需要的集成光电子器件。

现有常见的解复用阵列接收光电模块实现方式中研究比较多的是把阵列波导光栅(AWG)作为信道解复用芯片再和探测 PIN 芯片通过光波导采用平面波导(PLC)技术进行混合集成<sup>[3,4]</sup>。该方式具有结构紧凑、信道数很多,一般使用在 40 个信道数以上的密集波分复用系统,损耗可以很均衡等优势。但是,成本较高,而且在无源光网络(PON)系统中,由于用户数量最多只有 32 个,所以不需要采用阵列波导光栅的方式,可以采用成本更低的密集波分复用滤波片的方式来实现信道解复用。基于无源光网络系统的实际情况,并考虑到成本问题,本文选择密集波分复用薄膜滤波片加 PIN-TIA 来实现密集波分复用信道解复用和光电转换。同时,在无源光网络系统中光功率预算很紧张,所以,在做结构设计时,必须尽可能减少封装带来的损耗<sup>[5,6]</sup>。

## 2 密集波分复用-PIN-TIA 组件的设计原理

结构如图 1 所示。图 1 中输入光纤带有多个波长的光进入双芯插针,通过自聚焦透镜准直后变成平行光入射到密集波分复用滤波片,通过滤波片后,

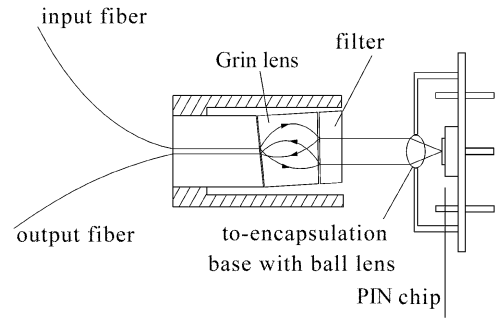


图 1 密集波分复用-PIN-TIA 组件的结构

Fig. 1 Structure of DWDM-PIN-TIA

与滤波片中心波长一致的光透射到带球透镜的同轴封装的 PIN-TIA 芯片上。其他波长的光束反射进入双芯的另外一端输出。

这里,采用双芯光纤输入输出的形式,双芯光纤和自聚焦透镜耦合因光纤偏离自聚焦透镜的对称轴会使透射光产生 $1.84^\circ$ 偏角,使得透过密集波分复用滤波片后的投射光线与 PIN-TIA 芯片耦合时产生耦合损耗。为了解决这个困难,将双芯光纤头抛磨成 $10^\circ$ 斜角,两光纤纤芯距为 $125\ \mu\text{m}$ ,自聚焦透镜后端面抛磨成 $8^\circ$ 斜角,因此自聚焦透镜和双芯光纤头耦合装配时,自聚焦透镜和金属套对称轴(或双芯光纤头的对称轴线)之间会产生 $2^\circ$ 的倾斜。经过理论计算,透射光线和金属套对称轴几乎平行,这样基本解决了和同轴封装的 PIN-TIA 组件耦合的问题。

根据透镜成像的矩阵理论<sup>[7,8]</sup>。当考虑近轴子午光线传播时,利用近轴条件 $\cos\theta \approx 1, n(r) \approx n_0$ ,光线的传输矩阵为

$$T(\lambda, P, L', L, d) = \begin{bmatrix} 1 & L' \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(P \cdot 2\pi) & \frac{\sin(P \cdot 2\pi)}{N_0(\lambda) \cdot \sqrt{A(\lambda)}} \\ -N_0(\lambda) \cdot \sqrt{A(\lambda)} \cdot \sin(P \cdot 2\pi) & \cos(P \cdot 2\pi) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d \\ \text{NA} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $d$  为双芯光纤头光纤间距之半,NA 为光纤的数值孔径, $L$  为光纤头端面距透径端面的距离, $P$  为透镜的节距, $\sqrt{A(\lambda)}$  为透镜的聚焦常数, $N_0(\lambda)$  为透镜轴线处的折射率, $L'$  为像点距透镜后端面的距离, $T(\lambda, P, L', L, d)$  为成像点的矩阵。

若为单芯光纤,可以近似地认为光纤置于透镜轴线上, $d$  为纤芯半径(点光源的半径),光纤头端面置于透镜前焦平面上,即

$$L = \frac{n_1}{N_0(\lambda) \cdot \sqrt{A(\lambda)} \cdot \tan(P \cdot 2\pi)}, \quad (2)$$

式中  $n_1$  为空气的折射率, $P$  取 0.249,可算得焦点距透镜端面距离  $L(\lambda) = L'(\lambda) = 0.012$ ,像方成像矩阵为

$$T(\lambda, P, L') = T(1.55, 0.249, 0.012) = \begin{bmatrix} 0.2328 \\ -0.0023335 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

即从透镜出射的准直光光斑几何半径为 0.2328 mm,发散角为 0.0023 rad。

若为双芯光纤,两光纤纤芯距之半恰好为点光源距透镜轴线的距离,在以透镜轴线建立的坐标系中,则

光线的  $ABCD$  传输矩阵为

$$T(\lambda, P, L', L, D) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{n_1}{N_0(\lambda) \cdot \sqrt{A(\lambda)} \cdot \tan(P \cdot 2\pi)} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(P \cdot 2\pi) & \frac{\sin(P \cdot 2\pi)}{N_0(\lambda) \cdot \sqrt{A(\lambda)}} \\ -N_0(\lambda) \cdot \sqrt{A(\lambda)} \cdot \sin(P \cdot 2\pi) & \cos(P \cdot 2\pi) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \frac{n_1}{N_0(\lambda) \cdot \sqrt{A(\lambda)} \cdot \tan(P \cdot 2\pi)} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} D/2 \\ NA \end{bmatrix}, \quad (4)$$

取纤芯距为  $0.125 \mu\text{m}$ , 可以算得光线偏折  $1.84^\circ$ . 转  
为插针对称轴线坐标系纵向偏移为

$$Y_{\text{out}} = T(\lambda, P, L', L, D)_{1,0} - X \times \tan(2 \times \frac{\pi}{180}), \quad (5)$$

透射光线偏折角为

$$\theta = T(\lambda, P, L', L, D)_{1,1} - 2 \times \frac{\pi}{180}, \quad (6)$$

式中  $X$  为滤光片的厚度, 计算后得知光线纵向偏移  
为  $0.103 \text{ mm}$ , 透射光线偏折角为  $0.08^\circ$ . 透射光线几  
乎和金属套对称轴(双芯插针轴线)平行。

这样通过巧妙独特的双芯插针和自聚焦透镜的  
结构设计, 解决了透射光偏离轴线带来的耦合问题。  
为了提高接收的带宽响应度, 光电探测器 PIN 管的  
光敏面需要做得很小, 但是这样会造成光线的泄露。  
为了提高接收的效率, 透射后的光线通过一个球透  
镜将光斑准直光聚焦后照射到处于球透镜焦平面上的  
PIN 管光敏面上, PIN 芯片和 TIA 前置放大器芯  
片一起安装在一个同轴管座上。当有相应波长的光  
输入时, 从同轴管座的引腿上就可以得到放大的了  
的数据电信号。整个结构被封装在一个金属套管中,  
一根光纤输入, 一根光纤输出, 4 个管脚输出。

### 3 多通道阵列接收模块的设计

通过图 1 可以看到, 当输入端有多个密集波分  
复用波长时, 只要选择不同中心波长的滤波片, 就能  
将不同波长的光滤出, 变成电信号。其余波长的光  
信号将通过输出光纤输出。如果将多级组件串联,  
将可以实现多通道同时探测, 结构如图 2 所示。

在这里, 每个通道的插入损耗主要考虑到密集  
波分复用滤波片反射和投射系数带来的损耗, 每通  
道损耗表示为

$$\text{Loss} = (n-1)\alpha + \beta, \quad (7)$$

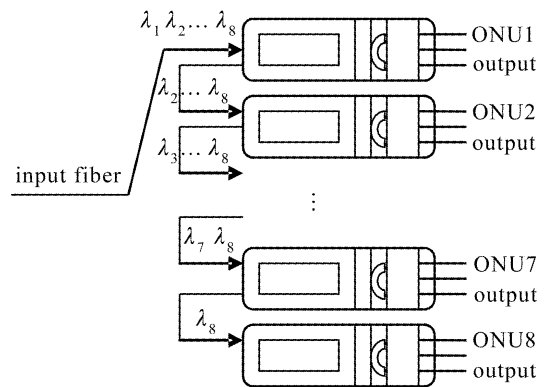


图 2 8 个通道的密集波分复用阵列接收模块

Fig. 2 8 channels DWDM array receiver module

式中  $\alpha$  为密集波分复用滤波片的反射系数,  $\beta$  为它的  
透射系数。可以看到第一个通道与最后一个通道相  
差比较大, 但是应用到波分复用无源光网络系统中  
没有问题, 因为目前无源光网络系统只有 32 个用  
户。

实验测得组件的参数如表 1 所示。阵列接收模  
块的实物图如图 3 所示。

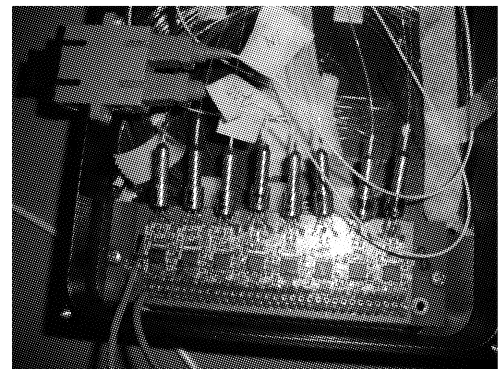


图 3 8 个通道密集波分复用阵列接收模块的实物图

Fig. 3 A photo of 8 channels array receive module  
for WDM-PON

光模块通过测试, 其接收灵敏度为  $-36 \text{ dBm}$   
( $100 \text{ Mbit/s}, 2^{23} - 1$ ) 和  $-26 \text{ dBm}$  ( $1.25 \text{ Gbit/s}, 2^{23} - 1$ )。密集波分复用介电薄膜滤波片, PIN/APD-

表 1 密集波分复用-PIN-TIA 中的测试参数  
Table 1 Performance of DWDM-PIN-TIA

| Performance                      |                  |
|----------------------------------|------------------|
| Central wavelength /nm           | ITU-T G. 692     |
| Return loss /dB                  | $\geq 40$        |
| Central wavelength tolerance /nm | 0.3~0.7          |
| Channel isolation /dB            | $\geq 30$        |
| Channel loss /dB                 | 0.5~6.0          |
| PIN responsibility / (A/W)       | $\geq 0.85$      |
| Bandwidth /nm                    | 0.5 dB $\geq 15$ |
|                                  | 30 dB $\leq 24$  |
| Respond rate / (Gbit/s)          | 1.25             |

TIA 集成芯片成本非常低廉,封装技术也不复杂,但是,需要根据计算精确定位,整个组件的成本可以控制非常低,该方式也适合在城域网和长途网的密

集波分复用/粗波分复用(CWDM)传输系统中使用,可以大大降低系统成本。

## 4 应用分析

在波分复用无源光网络系统中,每个光网络单元(ONU)所发出的不同波长的光信号作为上行信号光,经过合波后,耦合到上行信道的光纤中,传输到光线路终端(OLT)接收端,在接收端需要先把收到的光信号解分波后,将各个不同波长的光分开再分别送入不同的光电探测器,各自的探测器将接收变成电信号后,就将各个不同光网络单元的信号区分开,再分别送入到上层交换机或路由器中处理,如图 4 所示。

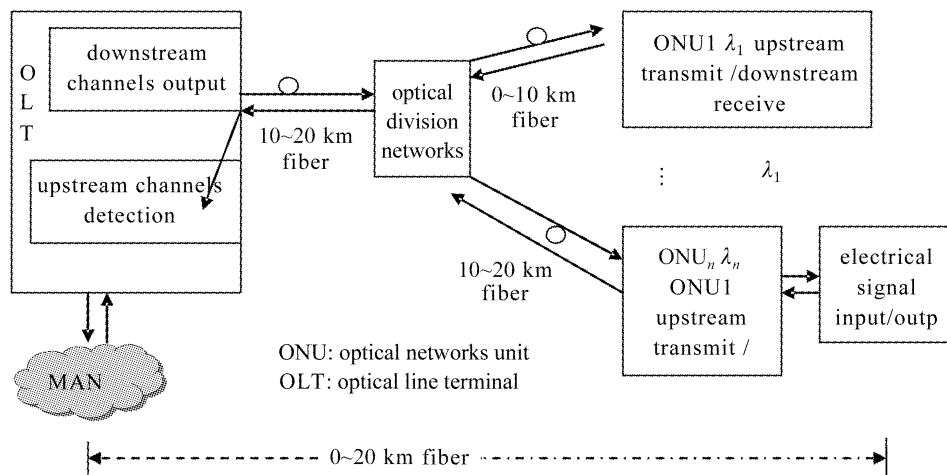


图 4 典型波分复用无源光网络系统和光电子器件

Fig. 4 Typical WDM-PON system and optoelectronics system

这里采用不同的波长来区分不同的用户,这样在技术上接收上行信号就非常简单,不需要像时分复用系统那样严格的测距、严格的延时控制和突发光发射和突发光接收模块,对于网络的升级、保密非常方便。

本文所研究的光模块可以用于光线路终端作为上行信道的阵列接收,可以一次性实现多个用户单元的解复用和光电转换,并具有体积小、集成度高的特点,具有很好的应用价值。

## 5 结论

通过采用 ABCD 矩阵的方法优化设计集成光电子器件中的结构,减少了耦合损耗,实现了将密集波分复用滤波片、自聚焦透镜、半导体光探测器 PIN 和电跨阻放大器 TIA 集成的光电探测组件和模块,可以应用于波分复用无源光网络系统中作为上行信

道的阵列接收。通过实验测试,阵列接收光模块的接收灵敏度是  $-36$  dBm ( $100$  Mbit/s,  $2^{23} - 1$ ) 和  $-26$  dBm ( $1.25$  Gbit/s,  $2^{23} - 1$ ),多通道的插入损耗为  $0.5 \sim 6$  dB,探测器的响应度为  $\geq 0.85$  A/W。满足国际电信联盟标准,具有很好的应用价值。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Qiming. A review on research of the key integrated optical device in optical networks [J]. *Science in China (E)*, 2002, **32** (4):516~522  
王启明. 光网络中关键性光子集成器件的研究进展[J]. *中国科学(E辑)*, 2002, **32**(4):516~522
- 2 S. Chandrasekhar, L. M. Lunardi, R. A. Hamm *et al.*. Eight-channel p-i-n/HBT monolithic receiver array at 2.5 Gb/s per channel for WDM applications [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(10):1216~1218
- 3 J. B. Soole, A. Scherer, Y. Silberberg *et al.*. Integrated grating demultiplexer and PIN array for high-density wavelength division multiplexed detection at  $1.5 \mu\text{m}$  [J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(6):558~560
- 4 Si Lu, Yingbai Yan, Guofan Jin. A novel DWDM interleaver

- scheme based on phased-array wavelength demultiplexer with multimode interference couplers [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(6):314~315
- 5 Liu Xu, Xiao Jinbiao, Sun Xiaohan. Alignment and coupling between planar lightwave circuit chip and wedge-shaped fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4):680~684  
刘旭,肖金标,孙小菡. 楔形光纤与半导体多量子阱平面光波光路芯片的耦合分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4):680~684
- 6 Hu Weisheng, Zeng Qinji. Optimum length matching of gradient-index-rod lenses in wavelength-division multi/demultiplexers [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(8):1041~1044  
胡卫生,曾庆济. 波分复用/解复用器中自聚焦棒透镜的长度匹配[J]. *光学学报*, 1999, **19**(8):1041~1044
- 7 Liu Hongzhan, Liu Liren, Xu Rongwei *et al.*. Application of optical matrix in semiconductor laser coupling [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6):825~828  
刘宏展,刘立人,徐荣伟等. 矩阵理论在半导体激光器耦合中的应用[J]. *光学学报*, 2005, **25**(6):825~828
- 8 Zhao Faying, Zhang Quan, Tang Haiqing. The coupling between a butt fiber and a spherical lensed fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(2):219~222  
赵发英,张全,唐海清. 平端光纤与锥端球透镜光纤的耦合[J]. *光子学报*, 2003, **32**(2):219~222