

文章编号: 0258-7025(2004)01-0065-04

# 监控 DWDM 系统工作波长的一种新方法

陈曦曜, 谢建平, 明海, 吴云霞, 许立新, 黄文财, 王安廷, 吕亮, 苑光辉, 章江英

(中国科学技术大学物理系, 安徽合肥 230026)

**摘要** 利用  $YVO_4$  双折射晶体, 设计了一种新型光通讯密集波分复用(DWDM)系统波长监控的方案, 分析了其工作原理, 并对方案的可行性进行了实验研究。理论和实验结果均表明, 这种方案能够用于整个 C 波段的 DWDM 系统工作波长监控与锁定。这种方案与使用 F-P 标准具的透射谱进行波长监控的方法相比, 具有标准工作波长容易判定、监控灵敏度倍增和易于集成等优点。

**关键词** 光纤通信技术; 波长监控;  $YVO_4$  晶体; 密集波分复用; 双折射

中图分类号 O 438; TN 929.11 文献标识码 A

## A Novel Method of Wavelength Monitoring in DWDM Fiber System

CHEN Xi-yao, XIE Jian-ping, MING Hai, WU Yun-xia, XU Li-xin,  
HUANG Wen-cai, WANG An-ting, LÜ Liang, YUAN Guang-hui, ZHANG Jiang-ying

(Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China)

**Abstract** By using the birefringent crystal  $YVO_4$ , a novel scheme of wavelength monitoring in DWDM optical communication systems is presented. The principle of this scheme is analyzed and its feasibility is inspected with experiments. Theoretical analysis and experimental results both show that it can be applied in C-band wavelength monitoring and locking in DWDM systems. As compared with the method of wavelength monitoring by means of the transmission spectrum of a Fabry-Perot etalon, this scheme has advantages such as easy judgment of normal operation wavelengths, high sensitivity of monitoring and easy integration.

**Key words** fiber communication technique; wavelength monitoring;  $YVO_4$  crystal; DWDM; birefringence

## 1 引言

光纤通讯作为现代通讯的主干道, 必须不断发展新技术, 以满足客观需要。作为一种近几年发展起来的新型光通讯系统, 密集波分复用(DWDM)系统可以允许频率间隔较小的多个光通讯信道同时工作, 致使光通讯系统的通讯能力大幅提高。DWDM 系统的波长密集程度越高, 其通讯能力越强。目前研究较多的是信道频率间隔为 100 GHz 和 50 GHz 的 DWDM 系统, 对频率间隔为 25 GHz 的系统也已经开始研究。

在 DWDM 系统中, 由于波长间隔很小, 各个信道的波长(或者说频率)稳定性就显得非常重要。波

长漂移比较大时, 就会产生信道混淆, 导致误码率增大甚至通讯中断。目前在光通讯系统中一般用分布反馈式(DFB)半导体激光器作为信号光源, 其波长会随着工作温度的变化而发生漂移, 漂移量可达  $0.1 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  (即  $12.5 \text{ GHz}/^\circ\text{C}$ )。这样的漂移量会严重影响 100 GHz 或 50 GHz 的 DWDM 系统的工作稳定性。因此, 有必要对 DWDM 系统中的各个工作波长进行监控。

目前, 主要利用干涉型的方法对 DWDM 系统进行波长监控<sup>[1~7]</sup>, 其中 F-P 标准具最为常用<sup>[5~7]</sup>。本文提出一种利用双折射晶体( $YVO_4$ )进行波长监控的新方法, 并对其可行性做了实验研究。

收稿日期: 2002-08-12; 收到修改稿日期: 2002-09-20

基金项目: 安徽省自然科学基金(批准号: 01042402)资助项目。

作者简介: 陈曦曜(1964—), 男, 福建福州人, 中国科学技术大学物理系博士研究生, 主要从事光纤通信器件和光纤传感器件的研究。E-mail: chenxy@mail.ustc.edu.cn

## 2 设计原理

### 2.1 偏振光经过 YVO<sub>4</sub> 晶体的传播特性

钒酸钇(YVO<sub>4</sub>)晶体是一种性能优良的双折射光学晶体,这种晶体化学性能稳定、机械性能好、透明波段宽(400~5000 nm),是正单轴晶体,它的双折射率  $\Delta n$  很大( $n_e - n_o = 0.2039$ ,在  $\lambda = 1550$  nm 处),比方解石的双折射率大,接近金红石,但它比金红石易于加工和生产。YVO<sub>4</sub> 晶体已广泛应用于光隔离器、光环行器和各种光学偏振棱镜的生产制造,近几年还用来做光交错波分复用/解复用器(Interleaver)<sup>[8]</sup>。

如图 1 所示,设平行光沿着  $z$  方向传播。 $P_1, P_2$  为偏振片,其表面与  $z$  轴垂直, $P_1$  透射轴方向平行于  $x$  轴, $P_2$  透射轴方向平行于  $y$  轴。YVO<sub>4</sub> 晶体加工成长方体形状,沿  $z$  方向的长度为  $d$ ,横截面为正方形并与  $z$  轴垂直,光轴沿  $O_1O_2$  方向(即与  $x$  轴, $y$  轴均成  $45^\circ$ 角)。

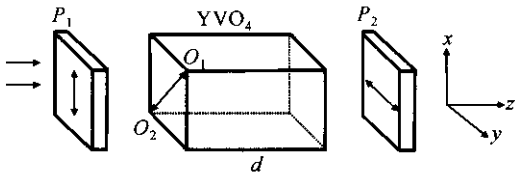


图 1 偏振光经过 YVO<sub>4</sub> 晶体的干涉

Fig. 1 Interference of polarizing beams through YVO<sub>4</sub> crystal

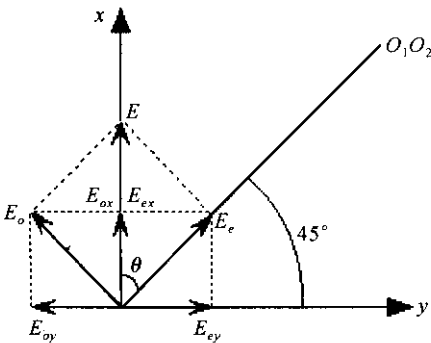


图 2  $x$  和  $y$  方向上光的干涉示意图

Fig. 2 Schematic diagram of beam interference in  $x$  and  $y$  directions

入射平行光经过偏振片  $P_1$  后,形成振动方向平行于  $x$  轴的平面偏振光,设其振幅为  $E$ 。如图 2 所示,当平面偏振光入射到 YVO<sub>4</sub> 晶体时,在晶体内分为  $o$  光和  $e$  光,振幅分别为  $E_o$  和  $E_e$ 。由于晶体的双折射性质,当光从晶体的后端面出射时, $o$  光和  $e$  光的位相差为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0}(n_e - n_o)d = \frac{2\pi f(n_e - n_o)d}{c} \quad (1)$$

式中  $\lambda_0$  为入射光在真空中的波长, $f$  为入射光频率。 $o$  光和  $e$  光在  $y$  方向上的振幅分量分别为  $E_{oy}$  和  $E_{ey}$ ,大小为

$$\begin{aligned} E_{oy} &= E_o \cos\theta = E \sin\theta \cos\theta \\ E_{ey} &= E_e \sin\theta = E \cos\theta \sin\theta \end{aligned} \quad (2)$$

当光经过偏振器  $P_2$  时, $E_{oy}$  和  $E_{ey}$  发生相干叠加,叠加后的光强度为

$$\begin{aligned} I_y &= E_{oy}^2 + E_{ey}^2 + 2E_{oy}E_{ey} \cos(\delta + \pi) = \\ &= 2E^2 \sin^2\theta \cos^2\theta (1 - \cos\delta) \end{aligned} \quad (3)$$

这里  $\theta = 45^\circ$ , 所以有

$$I_y = E^2 \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (4)$$

同理可知,如果  $P_2$  的透射轴方向平行于  $x$  轴,则透射光强度为

$$I_x = E^2 \cos^2 \frac{\delta}{2} \quad (5)$$

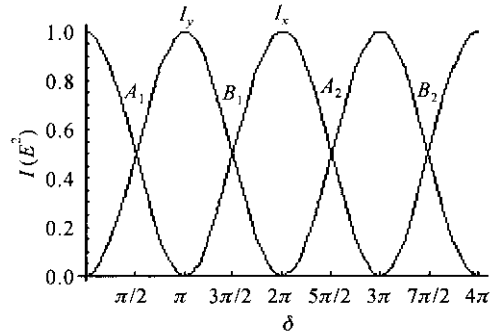


图 3  $I_y$  和  $I_x$  随位相差  $\delta$  的变化曲线

Fig. 3  $I_y$  and  $I_x$  variation with optical phase difference

图 3 表示  $I_y$  和  $I_x$  随位相差  $\delta$  的变化曲线。图中两条曲线的交点可分为两组  $A_i$  和  $B_i$ , 它们分别位于曲线  $I_x$  各个峰值的右侧和左侧。设  $A_i$  对应的频率为  $f_i$ ,  $B_i$  对应的频率为  $f_i'$ 。同组相邻交点的光程差间距为  $2\pi$ , 由(1)式可推得它们的频率间距为

$$\Delta f = \frac{c}{(n_e - n_o)d} \quad (6)$$

由于  $n_e$  和  $n_o$  随波长的变化很小,可认为  $\Delta f$  是均匀的。选取合适的晶体长度  $d$ , 使  $\Delta f$  等于相邻标准信道的频率间隔,就可利用图 3 中的一组交点  $\{A_i\}$  或  $\{B_i\}$  对 DWDM 系统的工作波长进行监控。

### 2.2 DWDM 系统波长监控方案的设计原理

根据国际电联(ITU)的规定,DWDM 系统标准信道的频率间隔为 100 GHz 或 50 GHz 或 25 GHz, 本文主要考虑频率间隔为 100 GHz 的系统。利用

YVO<sub>4</sub> 晶体的梳状滤波特性对 DWDM 系统的工作波长进行监控,设计框图如图 4。

其中 P<sub>1</sub> 为偏振片, BPBS(Broadband Polarizing Beamsplitter)为宽带偏振分光镜, PD1 和 PD2 为同规格的光电二极管。P<sub>1</sub> 透射轴和 YVO<sub>4</sub> 晶体光轴的方向同图 1。选择图 3 中一组交点 {A<sub>i</sub>} 对应的频率 {f<sub>i</sub>} 作为信道标准工作频率。设待监控的某个 DFB 激光光源的标准工作频率为 f<sub>1</sub>。信号光经过分光比为 5/95 的耦合器后, 95% 的光强作为输出信号光, 5% 的光强作为监控信号光。监控信号光经过准直器、偏振片 P<sub>1</sub> 和 YVO<sub>4</sub> 晶体后垂直入射到宽带偏振分光镜中。在偏振分光镜中, 平行光分成两路偏振方向互相垂直的平面偏振光, 一路沿原方向传

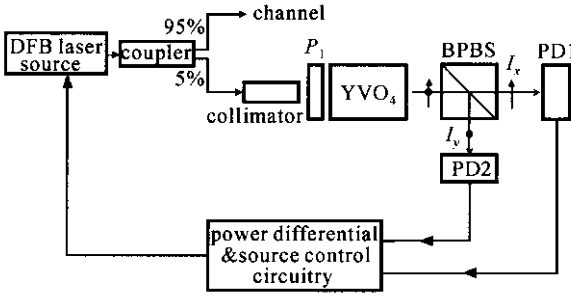


图 4 DWDM 系统信道波长监控方案装置图

Fig. 4 Setup of channel wavelength monitoring scheme in DWDM system

播, 另一路传播方向垂直于原方向, 如图中所示。分别用 PD1 和 PD2 检测这两路光的光强, 当接收到的光强 I<sub>x</sub> 和 I<sub>y</sub> 相等时, 表明光源的工作频率 f = f<sub>1</sub>; 当 I<sub>x</sub> ≠ I<sub>y</sub> 时, 表明工作频率发生了漂移。如果 I<sub>x</sub> > I<sub>y</sub> 时, 表明 f < f<sub>1</sub>; 如果 I<sub>x</sub> < I<sub>y</sub> 时, 表明 f > f<sub>1</sub>。所以根据 I<sub>x</sub> - I<sub>y</sub> 数值的符号和大小, 可以判断频率的漂移方向和漂移量, 再通过光源控制电路改变光源的工作温度, 从而调节工作频率至标准频率。

如果使用 F-P 标准具的梳状透射谱对 DWDM 系统进行波长监控, 工作频率的漂移量通常利用 I - I<sub>0</sub> 或 I/I<sub>0</sub> 来测量。其中 I 为被测光通过 F-P 标准具后的 PD 所测光强, I<sub>0</sub> 为被测光工作在标准频率时 PD 所测光强。因此, 必须先用其他仪器测出被测光频率等于标准频率, 才能确定 I<sub>0</sub> 的数值。而在本方案中, 标准工作频率的判断只要利用 I<sub>x</sub> = I<sub>y</sub>, 不需要测出标准工作频率以及 I<sub>0</sub> 的数值。另外, 当工作频率发生漂移时, I<sub>x</sub> 和 I<sub>y</sub> 的数值同时沿相反方向改变, 两者改变量相等。所以利用 I<sub>x</sub> - I<sub>y</sub> 来测量频率漂移量比用 I - I<sub>0</sub> 的方法测量灵敏度提高了一倍。

### 3 实验结果

利用掺铒光纤 ASE 宽带光源对 YVO<sub>4</sub> 晶体透射谱进行了实验研究, 实验装置如图 5 所示。

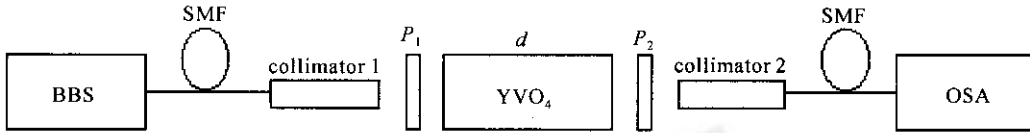


图 5 测量 YVO<sub>4</sub> 晶体透射谱实验装置

Fig. 5 Experimental setup for measuring transmission spectrum of YVO<sub>4</sub> crystal

图中 BBS 表示掺铒光纤自发辐射放大(ASE)宽带光源, OSA 为光谱分析仪(ANDO6317B 型)。偏振片 P<sub>1</sub> 透射轴和 YVO<sub>4</sub> 光轴的方向同图 1, 它们之间的夹角为 45°。偏振片 P<sub>2</sub> 可以绕光传播方向进行旋转调节, 以改变其透射轴方向。所加工的 YVO<sub>4</sub> 晶体长度为 d = 14. 301 ± 0. 001 mm, 将两个端面抛光并镀上增透膜。

首先测量在 C 波段中部位置的透射谱, 分别在 P<sub>2</sub> 透射轴沿 x 方向和沿 y 方向的条件下进行测量, 结果如图 6 所示。图中曲线 X 和 Y 分别表示 P<sub>2</sub> 透射轴平行于 x 方向和 y 方向的透射谱。这两条曲线的交点可分为两组, 选取位于曲线 X 透射峰右侧的那组交点频率数据为 DWDM 系统的工作信道标准

频率, 在图中用标号点来表示。OSA 记录图中 5 个

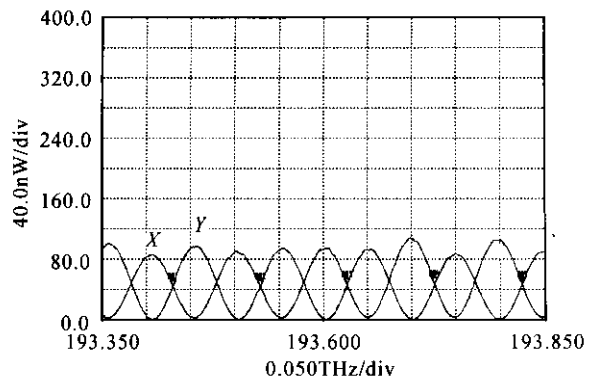


图 6 在 193.6 THz 附近的透射谱

Fig. 6 Transmission spectrum near 193.6 THz

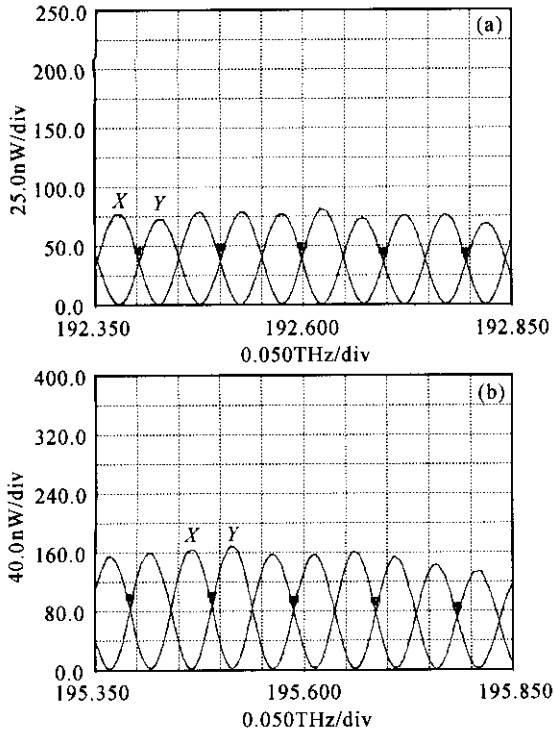


图7 在 192.6 THz(a)和 195.6 THz(b)附近的透射谱  
Fig.7 Transmission spectrum near (a) 192.6 THz  
and (b) 195.6 THz

标号点的频率分别为: MKR001: 193.430 THz, MKR002: 193.528 THz, MKR003: 193.627 THz, MKR004: 193.726 THz, MKR005: 193.824 THz。它们的频率间隔分别为: 98 GHz, 99 GHz, 99 GHz, 98 GHz。光谱仪分辨率为 4 GHz(最高分辨率), 因此可以断定在 193.600 THz 附近  $f_i$  的间隔是均匀的(在测量误差范围内)。

另外,在 C 波段的低频端和高端对 YVO<sub>4</sub> 晶体透射谱进行了测量,结果如图 7(a),(b)所示。

从 OSA 读出图 7(a)中的交点(用标号点指示)频率  $f_i$  为: MKR001: 192.403 THz, MKR002: 192.501 THz, MKR003: 192.599 THz, MKR004: 192.696 THz, MKR005: 192.795 THz, 对应相邻频率间隔为: 98 GHz, 98 GHz, 97 GHz, 99 GHz。图 7(b)中  $f_i$  为: MKR001: 195.392 THz, MKR002: 195.490 THz, MKR003: 195.588 THz, MKR004: 195.685 THz, MKR005: 195.784 THz, 对应频率间隔为: 98 GHz, 98 GHz, 97 GHz, 99 GHz。可以看出,频率间隔在高端和低端都是均匀的。

通过改变 YVO<sub>4</sub> 晶体的长度,可以使  $f_i$  的间距等于 100 GHz(符合 ITU 的规定)。以上实验表明 YVO<sub>4</sub> 晶体透射谱交点的频率间隔  $\Delta f$  在整个 C 波段是均匀的,因此同规格的 YVO<sub>4</sub> 晶体可用于 C 波段各个工作波长的监控与锁定。

## 4 结 论

利用 YVO<sub>4</sub> 晶体的高双折射性质,设计了一种新型 DWDM 系统波长监控方案。这种方案用两个透射谱的交叉点对等间距的多个工作信道频率进行监控,克服了使用 F-P 标准具的透射谱进行波长监控时,标准工作波长难以确定的问题。此外,由于对两个透射谱光强进行差分,相对于只用一个透射谱而言,波长漂移感应灵敏度提高了一倍。对峰值间距接近 100 GHz 的透射谱进行实验研究表明,所设计的方案可以应用于整个 C 波段 DWDM 系统各个信道波长的监控。

## 参 考 文 献

- 1 A. J. Keating, A. J. Lowery. Wavelength stabilization in packet-switched WDM networks [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(1):76~85
- 2 J.-P. Monochalin, M. J. Kelly, J. E. Thomas *et al.*. Accurate laser wavelength measurement with a precision two-beam scanning Michelson interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(5):736~757
- 3 M. Teshima, M. Koga, K.-I. Sato. Performance of multiwavelength simultaneous monitoring circuit employing arrayed-waveguide grating [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(10):2277~2285
- 4 G. E. Shtengel, R. F. Kazarinov, L. E. Eng. Simultaneous laser wavelength locking and spectral filtering using fiber Bragg grating [C]. *Int. Semiconduct Laser Conf.*, Nara, Japan, 1998. 269~270
- 5 B. Villeneuve, H. B. Kim, M. Cyr *et al.*. A compact wavelength stabilization scheme for telecommunication transmitters [C]. *WDM Comp. Technol.*, IEEE/LEOS Summer Top. Meetings, 1997. 19~20
- 6 S. Matsumoto, M. Fujise. Frequency stabilization of  $\lambda/4$ -shifted DFB laser to stabilised optical resonator [J]. *Electron. Lett.*, 1989, **25**(13):814~816
- 7 D. A. Ackerman, K. F. Dreyer, U. Koren *et al.*. Wavelength, modal, and power stabilization of tunable electro-absorption modulated distributed Bragg reflector lasers [C]. *Int. Semiconduct Laser Conf.*, Monterey, CA, 2000. 49~50
- 8 Cai Yanmin, Wang Xinge, Zhao Ling *et al.*. Principle of birefringence crystal type interleaver applied in DWDM fiber system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(11):1017~1020  
蔡燕民,王昕歌,赵岭等. 用于 DWDM 系统的双折射型 Interleaver 原理分析 [J]. *中国激光*, 2001, **A28**(11):1017~1020