

光通信中的光电子器件讲座

第二讲 光纤光栅器件在光纤通信中的应用*

辛 雨 张 茹 忻向军 余重秀

(北京邮电大学电子工程学院 北京 100876)

摘 要 主要叙述了几种典型的以光纤光栅为基础的新型光电子器件在光纤通信中的应用,并根据光纤光栅不同的折射率调制及光谱特性,简单介绍了其在各自领域内应用的基本原理。

关键词 光纤光栅,光纤通信,光电子器件

APPLICATIONS OF FIBER GRATING DEVICES IN FIBER COMMUNICATIONS

XIN Yu ZHANG Ru XIN Xiang-Jun YU Chong-Xiu

(The School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunication, Beijing 100876, China)

Abstract The applications of several typical optoelectronic devices made of fiber gratings in fiber communications are described. The fundamental principles underlying each application are presented according to the different forms of refractive index modulation and the spectral characteristics.

Key words fiber grating, fiber communication, optoelectronics devices

1 引言

近年来,随着信息业务量爆炸性增长,人们需要将语音、数据、图像等业务综合在一起传输,由于无线电频谱带宽和电缆带宽非常有限,而光的带宽达30THz以上,因此,人们便引入了光通信。光作为信息传输的载体使带宽不再成为通信网络的“瓶颈”。然而由于量子效应导致器件处理电信号存在着处理速率“瓶颈”。这使得人们再次意识到要突破电信号处理速率“瓶颈”就必须引入光信号处理方法,包括光信号的直接处理(即避免光/电和电/光转换,需要电信号时除外)及交叉连接等。目前,全光网通信的概念已经深入人心,有关全光网通信技术的研究也是如火如荼。全光网通信可以极大地提高节点的吞吐容量,适应未来高速宽带通信的要求。全光通信网也是目前国际上发展最快的领域,其性能每9个月翻一番,价格降低1倍,速度已经超过了摩尔定律(IC芯片性能每18个月翻一番)的1倍。而以光纤光栅为基础的光电子器件正是高速、宽带、全光网络的关键器件之一。

光纤光栅(FBG)是一种光纤无源器件。自从1978年K.O.Hill等人首先在掺锗光纤中采用驻波写入法制成世界上第一只光纤光栅以来,由于它具有许多独特的优点,在光纤通信、光纤传感等领域均有广阔的应用前景。随着光纤光栅制造技术的不断完善,应用成果的日益增多,使得光纤光栅成为目前

最有发展前途、最具有代表性和发展最为迅速的光纤无源器件之一。光纤光栅的出现,使许多复杂的全光网通信成为可能。

光纤光栅是利用光纤材料的光敏性,通过紫外光曝光的方法将入射光的相干场图样写入纤芯,在纤芯内产生沿纤芯轴向的折射率的周期性变化,从而形成永久性空间的相位光栅,其作用实质上是在纤芯内形成一个窄带的(透射或反射)滤波器或反射镜。当一束宽光谱光经过光纤光栅时,满足光纤光栅布拉格条件的波长将产生反射,其余的波长将透过光纤光栅继续往前传输。利用光纤光栅这一特性可构成许多性能独特的光电子器件。研究表明,光纤光栅具有体积小、波长选择性好、不受非线性效应的影响、极化不敏感、易于与光纤系统连接、便于使用和维护等优点,而且光纤光栅制作工艺比较成熟,易于形成规模生产,成本低,因此,它具有良好的实用性,它的优越性比其他许多器件无法替代的。

2 以光纤光栅为基础的新型光电子器件

利用光纤光栅的各种不同折射率调制及光谱特性,光纤光栅在光纤通信中可实现许多特殊的功能,有着广泛的应用,如:在光的发射端用于外腔光纤激光器;传输段用于光纤放大器的增益平坦;接收端用

* 国家“八六三”高技术计划资助项目、北京邮电大学校基金资助项目

2001-03-12收到,2001-05-08修回

于色散补偿器、解复用器、光的上下路器等等。下面简单介绍几种典型的、以光纤光栅为基础的新型光电子器件及其在光纤通信中的应用。

2.1 外腔光纤激光器

外腔光纤激光器是光纤通信系统中一种很有前途的光源,它是利用均匀光纤光栅来选择出射光的波长。外腔光纤激光器一般有两种结构:一种是分布布拉格反射(distributed Bragg reflectors, DBR)光纤光栅激光器,其基本结构如图1(a)所示;另一种是分布反馈(distributed feedback, DFB)光纤光栅激光器,其基本结构如图1(b)所示。图1(a)是利用一段稀土掺铒光纤(EDF)和一对均匀光纤光栅(Bragg 波长相等)构成谐振腔。图1(b)是利用直接在稀土掺杂光纤(如 EDF)写入的均匀光栅构成谐振腔。

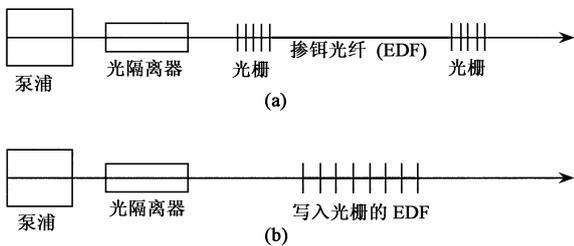


图1 外腔光纤激光器原理结构

为什么均匀光纤光栅可以构成谐振腔呢?让我们来看看均匀光纤光栅的结构和特征,均匀光纤光栅折射率分布通常表示为

$$n(z) = n_0 + \Delta n \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z \right], \quad (1)$$

式中 Λ 为光纤光栅折射率变化的周期。图2(a)是均匀光纤光栅折射率等周期分布情况。均匀光纤光栅反射光中心波长由下式决定: $\lambda_B = 2 n_{\text{eff}} \Lambda$, 其中 n_{eff} 为均匀光纤光栅的有效折射率。图2(b)为均匀光纤光栅的反射光谱特性,可以看出,均匀光纤光栅具有较窄的带宽。因此,利用这种光纤光栅的反射特性,通过一对均匀光纤光栅的不断反射来选频,从而使激光器的出射波长线宽很窄。

外腔光纤激光器作为光纤通信系统中一种很有前途的光源,它的优点主要体现在:激光出射波长的线宽极窄、可调谐;具有波导式光纤结构,与标准通信光纤的兼容性好;高频调制下的频率啁啾效应小、抗电磁干扰、温度膨胀系数较半导体激光器小;成本低等。因此光纤光栅在这方面大有用武之地。

2.2 掺铒光纤放大器

影响光纤通信向着长距离和高速率方向发展的两个主要因素是损耗和色散,其中的损耗问题自从掺铒光纤放大器(EDFA)产生后已得到解决。然而掺铒光纤放大器具有增益不平坦性。图3示出了掺铒

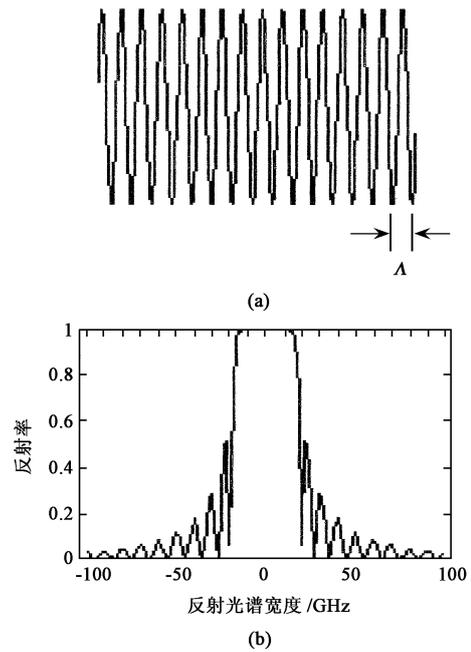


图2 均匀光纤光栅折射率分布及反射谱特性

光纤放大器的增益谱,可以看出,在波长为 $1.532\mu\text{m}$ 处为增益峰值,而在两边增益逐渐下降,这即为增益不平坦。这种增益不平坦性将导致不同波长的光信号增益不相等,严重影响着光信息的传输质量,因此必须解决这个问题。而所谓增益平坦就是将 $1.532\mu\text{m}$ 处的增益峰吸收或损耗了一部分,使其增益谱有一段宽的平坦的谱线,这段平坦谱线越宽越好。

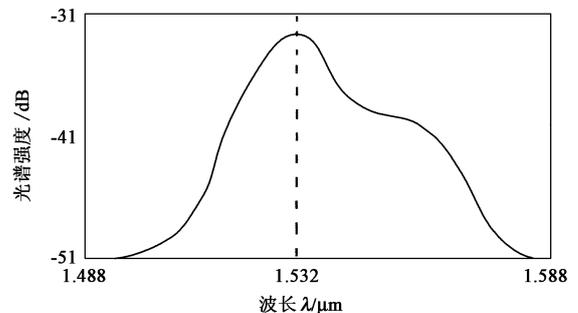


图3 掺铒光纤放大器的增益谱特性

利用闪耀(blazed)光纤光栅的透射谱特性可以抑制光纤放大器的增益峰,从而使引入闪耀光纤光栅后的光纤放大器的增益谱平坦化。

由于闪耀光纤光栅的折射率分布为

$$n(z \cos \theta) = n_0 + \Delta n \left| 1 + \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z \cos \theta \right] \right|, \quad (2)$$

式中 θ 为闪耀角,即折射率栅面法线 z' 与光纤轴向 z 的夹角(如图4所示),闪耀光纤光栅的反射谱(这里省略)与图3所示的光纤放大器增益谱具有很好

的相似性.因此,利用闪耀光栅的透射谱可恰好对光纤放大器增益峰的光功率进行衰减,从而可实现光放大器的增益平坦化.这种方法首先于1993年由英国的 R. Kashyap 等提出,他们所采用的是一段 3 mm 长的闪耀光栅,闪耀角约为 8° ,中心波长为 1532 nm,将此处增益压低,并在 35—40 nm 的带宽内使增益谱平坦度达到 ± 0.5 dB.1996 年, Ashish 等采用两个长周期(周期为 $474 \mu\text{m}$) 光纤光栅使 EDFA 在 25—30 nm 带宽内增益变化小于 0.2 dB.1998 年,台湾国立交通大学电子光学研究所的研究人员,将不同中心波长的普通光纤光栅置于掺铒光纤的不同位置上,利用光纤光栅的选频反射使不同波长的增益长度随泵浦效率变化,使光纤放大器在 30 nm 带宽内信号增益达 20.9 dB,平坦度 < 0.1 dB.因此,引入闪耀光纤光栅后的 EDFA 光纤放大器很好地解决了光纤通信中的损耗问题.

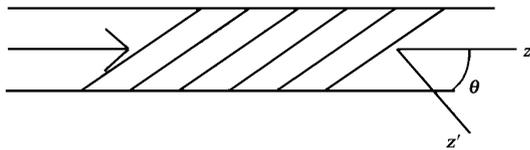


图 4 闪耀光纤光栅的折射率分布

2.3 光纤光栅色散补偿器

影响光纤通信系统的另一个主要因素是色散.所谓色散是指光脉冲在光纤中传输一段距离后,因各个频率成分的传播速度不同而使其光脉冲展宽(光纤通信中需要进行色散补偿的光脉冲一般处在反常色散区,即短波长分量比长波长分量传输得快),这样就产生了色散.在光纤通信系统中,信息是以编了码的光脉冲序列的形式在光纤中传输的,光脉冲的色散展宽会使接收时产生误码,因而需要解决色散问题.目前所采取的方法主要是利用色散位移光纤,色散位移光纤用量大且昂贵,使得系统成本提高;另一方面当色散位移光纤用于波分复用系统时,容易产生非线性效应,使信号间产生串扰.

光纤光栅的出现为人们提供了一种新的解决色散的方案,这就是采用啁啾光纤光栅进行色散补偿.

一种线性啁啾(chirped)光纤光栅折射率分布可表示为

$$n(z) = n_2 + \Delta n(z) \left| 1 + \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \varphi(z) \right] \right| \quad (3)$$

(3)式说明,线性啁啾光纤光栅折射率的变化周期是光纤芯轴方向 z 的函数,由此决定的反射波长也是 z 的函数.

啁啾光纤光栅的色散补偿原理如图 5 所示,在

啁啾光纤光栅中,反射波长(即谐振波长)是光纤光栅各点位置的函数,即沿光纤光栅的每一点都有一个本地布拉格谐振波长,因此不同波长的光在啁啾光纤光栅的不同位置上反射并具有不同的时延.光纤中传播光波的长波长分量(红移分量)在光栅的起始端被反射,传播光波的短波长分量(蓝移分量)在光栅的远端反射,即光波经过光栅后,蓝移分量的时延较红移分量的时延长,这样就补偿了色散所导致的短波长分量在前、长波长分量在后的情况.因此,利用啁啾光纤光栅就可以起到色散均衡的作用,从而实现色散补偿.

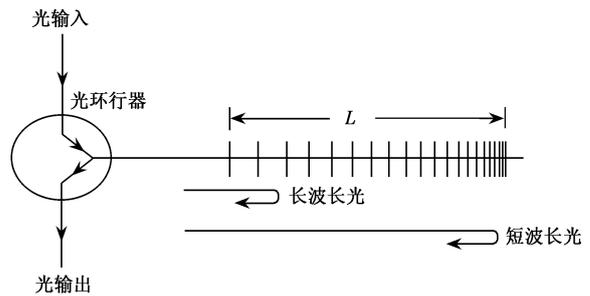


图 5 啁啾光纤光栅的色散补偿原理结构

啁啾光纤光栅的色散补偿量大,成本低,其潜在的应用价值使这一技术的研究成为国内外普遍关注的热点.

2.4 波分复用/解复用器

波分复用/解复用器是实现全光网通信的关键器件.光波分复用(WDM)是将两种或多种不同波长的光载波信号(携带各种信息)在发送端经复用器(multiplexer,亦称合波器)汇合在一起,并耦合到同一根光纤中进行传输;在接收端,经解复用器(demultiplexer,亦称分波器)将各种波长的光载波分离,然后由光接收机作进一步处理,以恢复原信号.由于均匀光纤光栅具有良好的滤波性能,并且有较窄的带宽.利用一组均匀光纤光栅的透射可以进行合波;利用其反射可以进行分波.因此,采用均匀光纤光栅可制成复用/解复用器.图 6 是利用均匀光纤光栅加光环行器制成的解复用器原理图,图中光纤光栅的中心波长分别为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$.复用信号($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$)经过解复用器后,各个波长分别从不同的端口输出,实现了光的解复用.

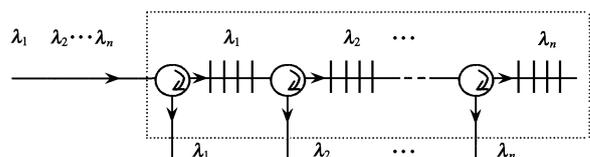


图 6 光纤光栅型解复用器的原理结构

波分复用器复用信道的波长间隔一般在几十到几百纳米。90年代后,密集波分复用器(DWDM)发展起来了,其波长间隔为 nm 量级。目前,国外关于密集波分复用器报道较多的是介质膜型、光纤光栅型和平面型。与另外两种相比,光纤光栅型密集波分复用器的优点是:具有优异的滤波形状,插入损耗低,隔离度高,装配时间短;缺点是:在构成实际的密集波分复用器时需要采用价格很贵的光环行器或马赫-曾特干涉仪,随着信道数的增加,其复杂性和成本也增加,而且对温度很敏感,需要温度控制。因此,光纤光栅型波分复用器有待于进一步研究,扬长避短,以便得到更加广泛的应用。

2.5 光分插复用器

光分插复用器(OADM)是光传送网的重要器件,它的功能是从传输设备中有选择地下路(drop)通往本地的光信号(即从多路信号组成的复用信号流中选出其中的一路或几路信号供本地使用),同时上路(add)本地用户发往另一节点用户的光信号,(即将本地复用到传输信号流中一并向前传输)而不影响其他波长信道的传输。也就是说,OADM在光域内实现了传统的SDH设备中电的分插复用器在时域中的功能。由于均匀光纤光栅具有良好的滤波性能,因而光分插复用器大多采用光纤光栅加光环行器及其他元件制成,也有利用光纤光栅TE-TM模转换来实现。因此,光纤光栅是OADM的核心器件。图7是光分插复用器的原理结构。复用信号($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$)从端口1输入,光纤光栅的中心波长是 λ_2 ,波长为 λ_2 的信号被光纤光栅反射,经光环行器从端口3输出(下载),其余波长则无附加损耗地通过光纤光栅,与从端口4上载的 λ_2 信号复合成新的复用信号,由端口2输出。这样就实现了光的分插复用。

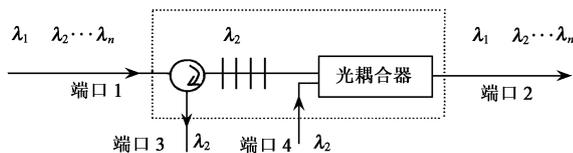


图7 光分插复用器的原理结构

采用光纤光栅来制作OADM无论是国内还是国外都发展得很快,国外自20世纪90年代中期开始出现大量的报道,各类方案异彩纷呈,成为各大公司和研究机构的研究热点。目前,OADM主要可分两种:可调谐和不可调谐。对于不可调谐的OADM,较简单的结构是采用两个光环行器与光纤光栅两端相连,利用光纤光栅无极性的特点,实现光信号的上下

链路。对于可调谐的OADM,所采用的调谐方案很多,主要有温度、拉力、压力、机械光开关等方法进行调谐。

利用光纤光栅制作的OADM在波分复用系统用于实现复用信道的上下链路,大大节省了系统的开销。在环形光网络系统中实现纯光的平滑出入,降低了成本,同时提高了传输效率。它的结构简单,制作成本较低,适应于光纤通信系统的全光化、集成化要求,其应用范围广,有很高的经济价值。

3 结语

光纤光栅是目前也是将来很长一段时期内光纤通信系统中最具有实用价值的无源光器件之一,利用它可组成多种新型的光电子器件,而且由于这些器件具有波长选择性好等优良性能而使人们更加充分地利用光纤通信系统的带宽资源。对光纤光栅的研究和开发正渗透到光纤通信系统的每一个角落,从波分复用系统的合波/分波、光纤放大器的增益平坦、色散补偿,到全光网络上下路、波长路由、光交换等等,光纤光栅的应用将大大的推动高速光通信的发展,将在未来的高速全光通信系统中扮演重要的角色。

在光纤光栅研究成果转化方面目前国内外的差距还不算太大,如今我国应集中力量发展民族光电子产业,让光纤光栅研究成果早日走向产业化,以振兴国家经济。

参 考 文 献

- [1] Pladian L. Phys. Rev., 1994, 48 :4758
- [2] Inoue A, Shgeharara M et al. Opto Tronics Devices and Technologies, 1995, 1 :119
- [3] Erdogan T. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15 :1277
- [4] 余重秀等. 光电子·激光, 2000, 11(2) :137 [Yu C X et al. J. Optoelectronics·Laser, 2000, 11(2) :137 (in Chinese)]
- [5] 纪越峰. 光波分复用系统. 北京:北京邮电大学出版社, 1999 [Ji Y F. Wavelength Division Multiplexed System. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 1999 (in Chinese)]
- [6] 原荣. 光纤通信网络. 北京:电子工业出版社, 1999 [Yuan R. Fiber Communication Network. Beijing: Electronic Industry Press, 1999 (in Chinese)]
- [7] Agrawal G P 著. 胡国峰, 黄超译. 非线性光纤光学. 天津:天津大学出版社, 1992 [Agrawal G P. Hu G J, Huang C trans. Non-linearity of Fiber Optics. Tianjing: Tianjing University Press, 1992 (in Chinese)]