

中华博士 园地

这是本刊特为海内外正在就读和学成立业的博士、博士后青年学者们开辟的一片科普园地。深学浅著,是一门德识、慧学、素质修养的学问。你们的新知识、新调研、新观察、新目光、新展望,能够用尽可能深入浅出、通俗流畅的语言,汇报给祖国、人民、家乡父老子弟乡亲们吗?中华博士园地,乃耕耘忠孝之地、科教兴国、民族昌盛之地。要用慈母听得懂的语言,写出你们的心声!

光纤光栅与未来的光纤通信

池 灏 章献民 陈抗生

(浙江大学信息与电子工程学系,杭州 310027)

1 引 言

光纤通信是人类20世纪最伟大的发明之一。自从本世纪70年代初第一根实用化光纤问世以来,光纤通信这项高技术得到了迅猛的发展,并对人类社会生活产生了巨大的影响。人类社会正迈步进入信息时代,光纤无可质疑地成为信息交换中最重要的传输媒介。

虽然当今的光纤通信技术已经发展到了空前的规模,信息传输率在过去的十年间增加了200倍,目前商用光纤系统的最高速率已达到了10GHz($1\text{G}=1\times 10^9$),就实验室水平而言,单一通道线性传输速率已高达20GHz,但与光纤本身所具有的带宽相比还是微不足道的。因为信息的容量与载波频率成正比地增加,用于光纤通信的载波频率在 $10^{13}\sim 10^{14}$

Hz 范围,应该有相当数量的通信能力。迄今为止,商用光通信系统大都采用单波长的时分复用方式,利用的带宽还不到光纤200nm 低损耗区的1%,绝大部分带宽还未充分地利用。然而就通信器件本身来说,20GHz 的传输率已接近光调制器和探测器的极限,已经没有多大可发掘的潜力。因此,采用波分复用技术以发掘光纤所固有的巨大带宽是今后必然的趋势。

光纤的损耗和色散是影响光纤通信能力的两个重要的因素。如图1所示,损耗的存在使光脉冲经过一段光纤后,光功率降低。色散是指对于不同光频率,具有不同的群速度,而任何光源都具有一定的谱宽,其后果是经光纤传输后,光脉冲展宽,致使相邻脉冲发生混叠。损耗和色散的存在使光传输一段距离后必须进行中继,从而影响系统的带宽距离积。目前的光纤制造技术已很成熟,商用光纤在1550nm 附近的损耗几乎已降到理论极限值。90年代初掺铒光纤放大器的研究成熟与迅速商品化给光纤通信带来了新的前景,利用光纤放大器能够方便的在线路上实现光放大。光纤放大器的诞生使得光纤的损耗不再是光纤系统设计所考虑的主要因素,如果结合适当的色散补偿技术,那么目前光通信的面貌将大大

池 灏 男,26岁,1994年毕业于西安交通大学应用物理系,1997年毕业于浙江大学,光电信息工程学系,并获工学硕士学位。现为浙江大学信息与电子工程学系,博士研究生。主要研究方向为:光纤通信的波分复用与色散补偿以及光纤光栅在通讯和传感中的应用。

改观,通信系统的带宽距离积会大幅度提高,甚至能够实现无中继光纤通信。

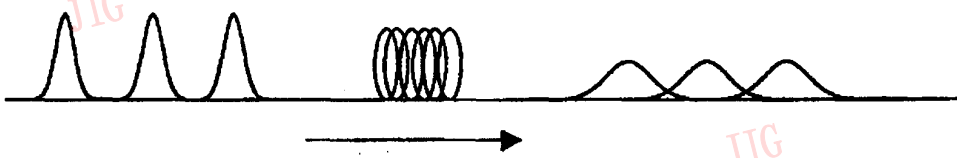


图1 光纤的损耗和色散对光脉冲的影响

恰好,光纤光栅在波分复用和色散补偿这两个方面都有着巨大的潜能。光纤光栅是利用掺杂光纤的光敏性,通过强激光使光纤的折射率随光强的空间分布发生相应的变化,由于其独特的时域、频域特性,光纤光栅日益得到人们的重视。它在光通信、光信息处理、传感器等许多领域有着广泛的应用前景。在光通信领域,光纤光栅将影响包括波分复用和色散补偿在内的从光发送到光接收的各个方面。

2 光纤光栅制作及特性

光纤光栅的研究始于1978年,加拿大的 K. O. Hill 首先观测到掺锗光纤在氩离子 488nm 或 514.5nm 的注入激光与光纤断面的菲涅尔反射形成的干涉驻波场曝光作用下产生光栅效应。但此后十年,光纤光栅的研究并未取得多大进展,直到1989年,G. Miltz等人提出不需要去掉包层用紫外光侧向全息干涉技术来制作光纤光栅。全息干涉制作光纤光栅方法的提出,预示着光纤光栅具有实用化的商业前途,激起了研究者的极大兴趣,加、美、日、澳等国相继投入了相当的研究力量。继全息干涉法制作光纤光栅后,光纤光栅制作技术朝方便灵活、稳定可靠、光栅参数可控等方向发展,新的制作技术不断涌现,如相位 Mask 技术、单脉冲技术、点一点光栅写入技术。其中相位 Mask 技术普遍被人们看好,且目前的工艺较为成熟。如图2,相位掩模板是经刻蚀的玻璃光栅,对紫外光透明,并且相位掩模板经特殊处理,使得零级衍射光被抑制,大部分衍射光集中在+1级和-1级。紫外光照射时,掩模板的±1级衍射光互相干涉,沿光纤方向就形成了周期性的光强调制,从而形成光纤光栅。

光纤光栅的折射率调制是一种类似于晶格的周期性结构,具有带阻滤波器的性质,由于纤芯折射率

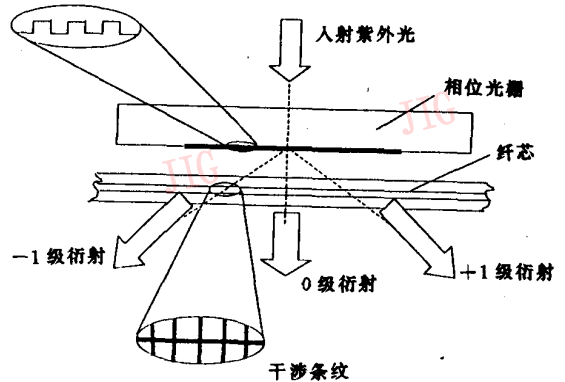


图2 基于零级抑制相位 Mask 光纤光栅制作技术示意图

的变化,入射光将有一窄带被反射,最强的反射或模式耦合发生在 Bragg 波长处: $\lambda^B = 2np$,其中 n 为有效折射率, p 为栅距。实验研究发现,光栅反射带宽与光栅强度有关,并且有如下近似式: $\Delta\lambda = \lambda\Delta n/n$ 。相位 Mask 技术不仅能高效、可靠地制作光纤光栅,还能用于制作有特定频谱响应特性要求的光栅。比如,普通均匀光栅的反射频谱在主峰两侧会有次极大(即旁瓣)的存在,在用于波分复用时,上述效应会降低通道隔离度,引起串扰。但是,通过被称为变迹的过程,使沿光纤长度方向的折射率调制呈钟形曲线分布,可以有效地抑制旁瓣。相位 Mask 技术还可用于制作所谓的啁啾光栅,啁啾是指沿光纤长度方向改变光栅周期以期展宽反射谱或改善时域、谱域特性。光纤光栅用于色散补偿时,啁啾显得特别重要。

光纤特性如张力、温度、偏振发生变化,将会使光栅有效折射率或栅距改变,从而影响 Bragg 波长,这是光纤光栅应用于传感器的基础。

3 光纤光栅在波分复用和色散补偿中的应用

光纤光栅几乎可以运用到光纤通信的每一个领域,光纤光栅器件具有反射带宽范围大(0.02~50nm)、体积小、能与光纤很好地耦合等优异性能。用光纤光栅制成波分复用/解复用器件是光纤光栅重要的应用之一。

前面讲到,传统的单波长通信方式实际上只利用了光纤潜在的巨大带宽的一小部分。因此,密集波分复用系统在新一代光纤高速通信中必将得到应用,这一点已成为共识。图3所示的以 Mach-Zehnder

干涉仪为基础的波分复用/解复用器件,可以实现把一个波长信道从传输信道上分离出来,或者把一个波长信道插入到传输信道上。干涉臂上是两个相同的 Bragg 光栅,它们具有相同的 Bragg 反射波长和类似的频谱特性,同时为了调整两臂的光程差,用紫外光照射到一臂的纤芯上,使纤芯的折射率发生变化,从而使两臂满足相位匹配条件。该复用/解复用器件能在1550nm 处,对信道间隔为100GHz($\Delta\lambda=0.8@1550nm$,为 ITU 建议的波道间距)的信号进行有效的波分复用/解复用。若两臂上的光栅的 Bragg 波长为 λ_3 ,可以从端口2解复用出波长 λ_3 ,也可从端口3插入波长为 λ_3 的波长信号。

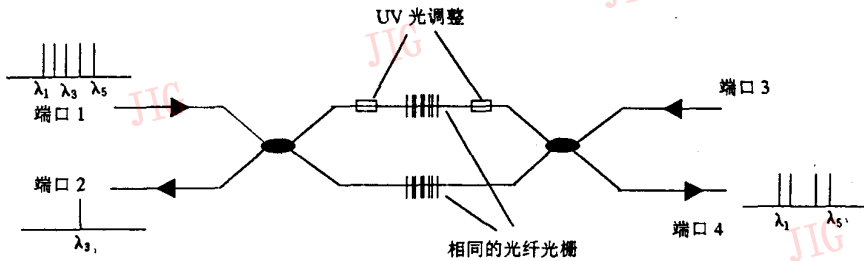
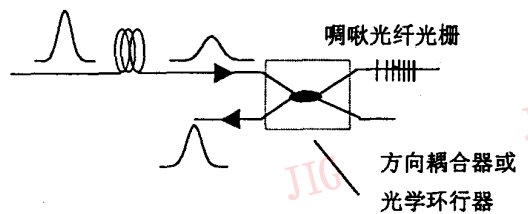
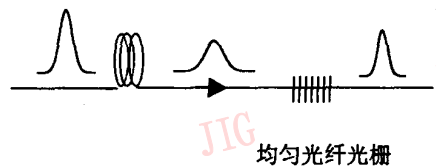


图3 基于 Msch-Zehnder 干涉原理的光纤光栅波分复用器

随着掺铒光纤放大器的研究成功,使得光纤损耗不再是限制光纤传输能力的主要因素。因此,如何有效地对系统的色散进行补偿就成了光纤通信中急需解决的问题。现已有不少色散补偿的方法,光纤光栅色散补偿器与其他方法相比,具有低损、高效、轻巧、价廉、灵活方便的特点。普通的单模光纤,在1550nm 处处于反常色散区,即高频分量传播得快。入射光脉冲通过一段普通单模光纤传输后,会发生展宽,且经过距离越长,展宽程度越厉害。对于数字通信来说,色散使得相邻脉冲发生混叠,从而影响了系统的带宽距离积。如图4所示,线性啁啾光栅能对光纤的色散进行有效的补偿。其基本原理是:啁啾光栅的调制周期呈线性变化,入射光脉冲在不同反射点具有不同的反射波长,在1550nm 负反射区高频分量的群速度快于低频分量,若使光栅周期长的一端在前,使得低频(即长波长)分量在光栅的前端被反射,而高频分量在光栅的末端反射,这样经过啁啾光栅的反射,光脉冲的高频分量比低频分量多走了一段距离,从而使滞后的低频分量赶上高频分量,被展开的光脉冲又重新被压缩,完成了色散补偿。



(a)反射方式



(b)传输方式

图4 光纤光栅在色散补偿中的应用

已有报道,利用一对10cm 长的变迹啁啾光栅,成功地完成了对537km 长,传输速率为10Gb/s 的传输系统进行了有效的色散补偿。以上所述的色散补偿是工作在反射方式,必须用光学环形器或耦合器,

且有2—3dB的衰减。此外,有建议利用均匀光栅传输谱在反射峰附近的色散特性来进行色散补偿,基于传输方式的色散补偿方案有较大的优势,不需要光学环行器,衰减也小,目前正处于研究之中。

4 其他应用

光纤光栅器件的优势在于易于集成,从而使整个通信系统简单化、小型化。除了应用于上述的波分复用、色散补偿以外,光纤光栅还可用于制作光纤激光器、光纤分布反馈式激光器、光纤滤波器、超短脉冲发生器等器件。这些器件在光纤通信系统中将起十分重要的作用,也为全光通信创造了极好的条件。在未来的长距离、高速率、低成本的光纤通信系统

中,光纤光栅将发挥举足轻重的作用。光纤光栅广泛的潜在应用领域,除了上述在光通信中的应用外,它还可在光纤模式转换器、光交换、波长转换器、光存贮等方面发挥作用。

光纤光栅是一种简单的本征传感单元,其Bragg波长会随光纤特性(如温度、应力等)的改变而改变,利用这一点可以制作传感器。图5所示的应力传感器就是根据光栅Bragg反射波长随外加应力的改变而改变,从而根据波长的变化探测出光纤光栅所受的应力。基于光纤光栅的传感器除了具有一般光纤传感器的无源操作、抗电磁干扰、灵敏度高、具备复用能力外,更具备分布式传感的能力,从而显示出广泛的应用前景。

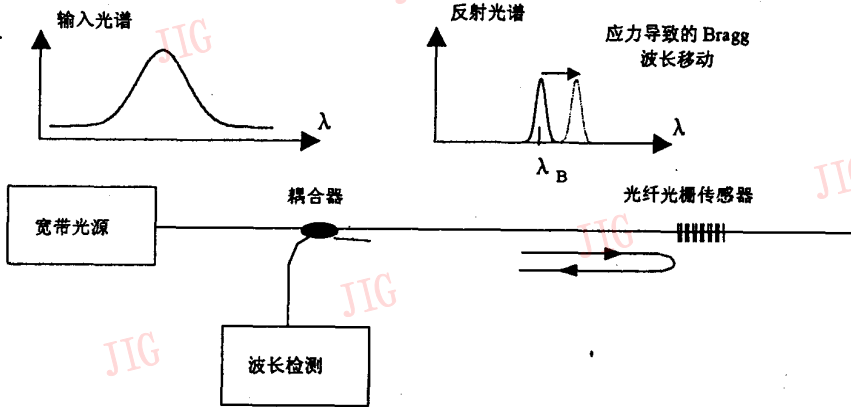


图5 基于光光栅的应力传感器原理图

5 结 语

在某种程度上,光纤光栅及其器件的出现在光纤通信历史上具有划时代的意义,它将改变目前光通信的面貌,并为未来的长距离、大容量的光纤通信和全光通信打下良好的基础,并且光纤光栅在其他领域也有着许多重要的应用。目前留给科技工作者的任务是,如何迅速地将光纤光栅器件实用化、商品化,使之从实验室走向市场,并大力发掘光纤光栅潜在的应用。

参 考 文 献

1 Hill K O, et al. Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals

and Overview, J. of Lightwave Technology, 1997,15(8).

2 刘永红等. 应用光纤光栅的马赫—陈德尔型波分复用器特性的理论分析,光学学报,1998,18(1).

3 Loh W H et al. Dispersion Compensation Over Distances in Excess of 500 km for 10-Gb/sb Systems Using Chirped Fiber Gratings. IEEE Photonics Technology Letter, 1996,8(7).

4 Litchinitser N M, Fiber Bragg Gratings for Dispersion Compensation in Transmission: Theoretical Model and Design Criteria for Nearly Ideal Pulse Recompression, J. of Lightwave Technology, 1997,15(8).

5 Kersey A D, et al. Fiber Grating Sensors, J. of Lightwave Technology, 1997,15(8).