



摘要：本文报道了光纤传感器国内外发展的现状。主要介绍了两方面的情况：光纤传感器原理性研究的发展现状和光纤传感器产品的应用与开发的现状。前者报道了光纤光栅、分布式光纤传感技术以及光纤传感网的发展，这些是目前的研究热点；后者介绍了光层析成像技术、智能材料、光纤陀螺及惯性导航系统、工业工程类传感器（其中包括电力工业用高电压、大电流传感器，利用光纤的弹光效应和 FBG 器件的应力传感器等）。最后介绍了新型光纤材料与器件、氟化物玻璃光纤、碳涂覆光纤、以及正在研究中的蜂窝型波导光纤、液晶光纤等。

关键词：光纤传感技术；光纤传感发展；光纤传感应用

中图分类号：TP212.14 文献标识码：A 文章编号：1006-883X(2004)02-0006-07

►► 廖延彪 黎敏

一、引言

随着密集波分复用 DWDM 技术、掺铒光纤放大器 EDFA 技术和光时分复用 OTDR 技术的发展和成熟，光纤通信技术正向着超高速、大容量通信系统的方向发展，并且逐步向全光网络演进。在光通信迅猛发展的带动下，光纤传感器作为传感器家族中年轻的一员，以其在抗电磁干扰、轻巧、灵敏度等方面独一无二的优势，已迅速成长为年成交额超过 10 亿美金，并预计将于 2010 年拥有超过 50 亿美金市场的产业。每年由美国光学工程师学会(OSA)主办的光纤传感国际会议(OFS)及时报道着光纤传感领域的最新进展，并对光纤传感及其相应技术进行有益的研讨。

当前，世界上光纤传感领域的发展可分为两大方向：原理性研究与应用开发。随着光纤技术的日趋成熟，对光纤传感器实用化的开发成为整个领域发展的热点和关键。由于光纤传感技术并未如光纤通信技术那样迅速地获得产业化，许多关键技术仍然停留在实验室样机阶段，距商业化有一定的距离，因此光纤传感技术的原理性研究仍处于相当重要的位置。由于很多光纤传感器的开发是以取代当前已相当成熟，可靠性和成本已得到公认，并已经被广泛采用的传统机电传感系统为目的，所以尽管这些光纤传感器具有如电磁绝缘、高灵敏度、易复用等诸多优势，其市场渗透所面临的困难和挑战是可想而知的。而那些具有前所未有全新功能的光纤传感器则在竞争中占有明显优势，FBG 和其它的光栅类传感器就是一个最好的例证。当前的原理性研究热点集中于光纤光栅(FBG 和 LPG)型传感器和分布式光纤传感系统两大板块。

FBG 型光纤传感器自发明之日起，已走过了原理性研究和实验论证的百家争鸣阶段。目前成熟的 FBG 制作工艺已可形成小批量生产能力，而研究的焦点也转向解决高精度应用，完善解调和复用技术，以及降低成本等几个方向上。另一方面，由于光纤传感器具有将传输与传感媒质合而为一的特性，使得沿布设路径上的光纤可全部成为敏感元件，因此，分布式传感成为光纤传感器与生俱来的优点。

对于光纤传感技术的应用研究主要有以下四大类：光（纤）层析成像技术（OCT，OPT）、智

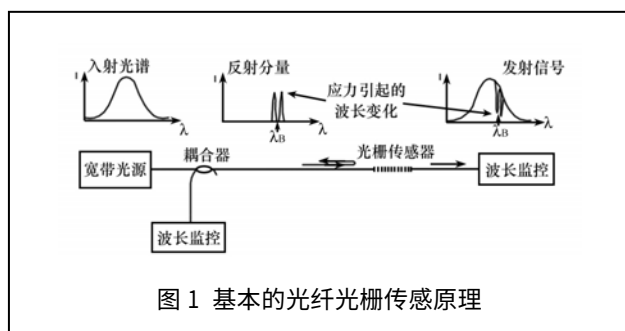


图1 基本的光纤光栅传感原理

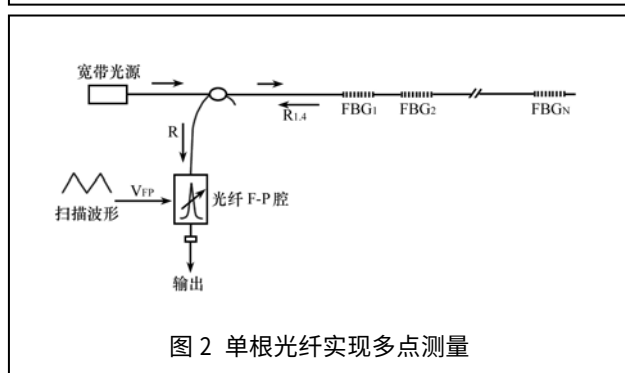


图2 单根光纤实现多点测量

能材料 (SMART MATERIALS)、光纤陀螺与惯导系统 (IFOG, IMIU) 和常规工业工程传感器。另外，由于光纤通信市场需求的带动以及传感技术的特殊要求，新型器件和特种光纤的研究成果也层出不穷。

目前，我国的光纤传感器研究大多数集中于大专院校和科研单位，仍然未完成由实验室向产品化的过渡。其中，比较成熟的技术包括：清华大学光纤传感中心与总后合作研制开发的光纤油罐液位与温度测量系统，已经安装运行数年；北京航空航天大学与总装合作研制的光纤陀螺系统，目前指标为 $0.2^\circ/\text{hr}$ ；中国计量学院研制的分布式光纤传感系统，已有产品报道；华中理工大学与广东某公司联合研制的强电压、大电流传感系统。此外，在广东、深圳等地，还建立了许多光纤无源器件生产厂家。由于光纤传感器未能跨越产品化的门槛，并未象光纤通信产业那样成指数型增长，许多与我们日常生活密切相关的传感器产品（如交通管理、警报装置等）和大量的测试仪器依然依赖于进口，亟待发展的空间非常广阔。

二、光纤传感器的原理性研究

1、光纤布拉格光栅

光纤布拉格光栅 FBG 于 1978 年问世^[1]，这种简单的固有传感元件，可利用硅光纤的紫外光敏性写入光纤芯内，图 1 描述了光纤光栅的基本原理。常见的

FBG 传感器通过测量布拉格波长的漂移实现对被测量的检测，光栅布拉格波长 (λ_B) 条件可以由式 (1) 表示：

$$\lambda_B = 2 \cdot n \cdot \Lambda \quad (1)$$

式中， Λ —光栅周期；

n —折射率。

当宽谱光源入射到光纤中，光栅将反射其中以布拉格波长 λ_B 为中心波长的窄谱分量。在透射谱中，这一部分分量将消失， λ_B 随应力与温度的漂移为^[2]：

$$\Delta\lambda_B = 2n\Lambda \left\{ \left[1 - \left(\frac{n^2}{2} \right) [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{22})] \right] \cdot \varepsilon + \left[\alpha + \frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dT} \right] \Delta T \right\} \quad (2)$$

其中， ε —外加应力；

P_{ij} —光纤的光弹张量系数；

ν —泊松比；

α —光纤材料（如石英）的热膨胀系数；

ΔT —温度变化量。

上式中： $\left(\frac{n^2}{2} \right) [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{22})]$ 因子典型值为 0.22。

因此，可以推导出在常温和常应力条件下的 FBG 应力和温度响应条件如式下：

$$\frac{1}{\lambda_B} \frac{\partial \lambda_B}{\partial \varepsilon} = 0.78 \times 10^{-6} \mu \varepsilon^{-1} \quad (3)$$

$$\frac{1}{\lambda_B} \frac{\partial \lambda_B}{\partial T} = 6.67 \times 10^{-6} ^\circ\text{C}^{-1} \quad (4)$$

1pm 的波长分辨率大致对应于 $1.3\mu\text{m}$ 处 0.1°C 或 $1\mu\varepsilon$ 的温度和应力测量精度。

光纤光栅除了具备光纤传感器的全部优点之外，还拥有自定标和易于在同一根光纤内集成多个传感器复用的特点。图 2 是光纤光栅传感器在一根光纤内实现多点测量的例子^[3]。

光栅传感器可拓展的应用领域有许多，如将分布式光纤光栅传感器嵌入材料中形成智能材料，可对大型构件的载荷、应力、温度和振动等参数进行实时安全监测；光栅也可以代替其它类型结构的光纤传感器，用于化学、压力和加速度传感中。

图 3 为传统阻抗计与 FBG 传感器测试结果的比较。美国的 MICRON-OPTICS 公司所研制的 FBG 应用系统 Si425^[9] (见图 4)，可同时测量多达 4 路 512 个 FBG 传感器，扫描范围 50nm、分辨率 1pm、测量频率可达 244Hz。

长周期光栅是指周期大于 $100\mu\text{m}$ 的光栅,也是继 FBG 之后光纤光栅型传感器的另一个重要分支。由于测量利用包层膜耦合的原理,使其同时具备灵敏度优良和制作简便的优势。图 5 是长周期光栅的透射谱。光纤光栅的其它分支还包括啁啾光栅、斜光栅等^[2],它们也已付诸应用研究^[6]。

2、分布式光纤传感系统

在世界范围内,由于对工民建和工业设施安全性和效益要求的不断提高,对集成的安全检测系统的需求逐步攀升。具备可连续、无间断、长距离测量并与被测量介质有极强的亲和性的分布式光纤传感系统似乎正是为此而量身定做的。分布式光纤传感系统通常有三种类型:拉曼型、布里渊型和 FBG 型。

拉曼型分布式光纤传感系统是基于光纤拉曼散射效应的连续型传感器,其工作原理见图 6。三种类型的传感系统的应用都已见诸于报道。其中尤以拉曼型分布式传感系统最为成熟,已成功地装载于 A340 运输机上(图 7)。

FBG 型分布式传感系统在应力多点分布式测量中有独到的优点,并可同时完成温度和应力的双参量测量^[5],为 FBG 应用开辟了更为广阔的前景。图 8 介绍了采用 WDM/TDM 解调的 FBG 阵列的拓扑结构^[4]。

三、光纤传感器产品的应用与开发

光纤传感器的应用开发根据当前的应用热点领域和技术类型可大致分为四个大的方向:光(纤)层析成像分析技术 OCT、光纤智能材料(SMART MATERIAL)、光纤陀螺与惯导系统、以及常规工业工程传感器。2002 年是光纤陀螺(I-FOG)诞生的 25 周年,在第 15 届 OFS 年会上,特别为光纤陀螺开辟了专题会场。

1、光层析成像技术

光纤层析成像分析技术从兴起到应用不过只有二、三十年的时间,根据不同的原理和应用场合,可将光纤层析技术分为光相干层析成像分析(OCT)和光过程层析成像分析技术(OPT)。

光层析成像技术源于 X 射线层析成像分析(CT),其基本原理如图 9 所示。当 X 射线或光线传输经过被测样品时,不同的样品材料对射线的吸收特性有不同,因此对经过样品的射线或光线进行测量、分析,并根据预定的拓扑结构和设计进行解算就可以得到所需要的样品参数。

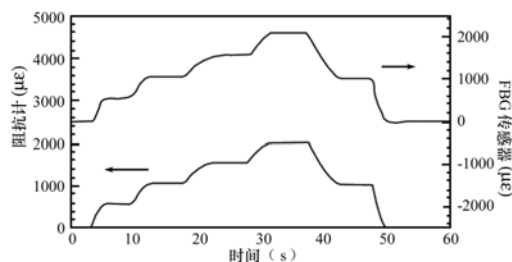


图 3 FBG 传感器与传统传感器信号的比较



图 4 Si425 光栅解调系统

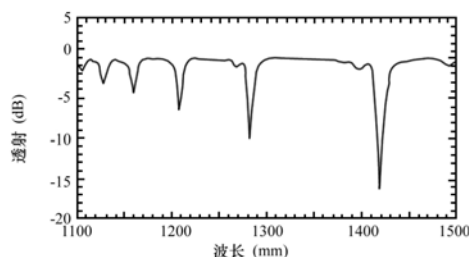


图 5 长周期光栅透射谱

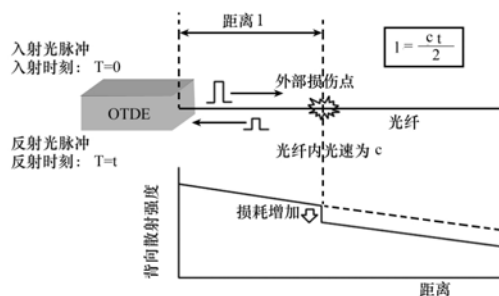


图 6 拉曼型分布式传感器工作原理

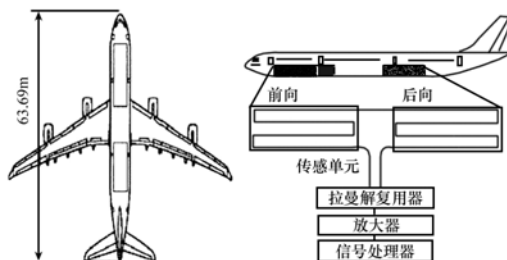


图 7 拉曼型分布式传感系统在 A340 运输机上

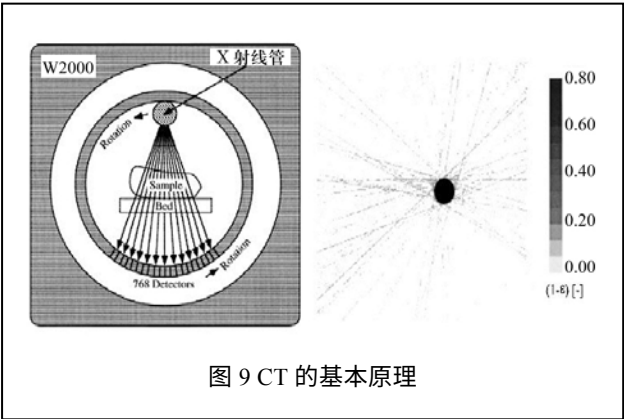
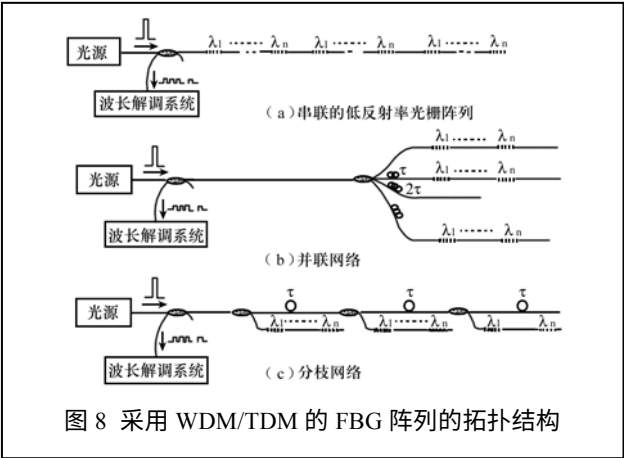


图 9 CT 的基本原理

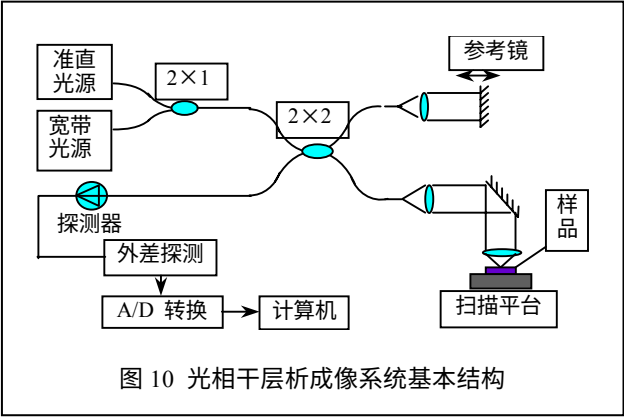


图 10 光相干层析成像系统基本结构

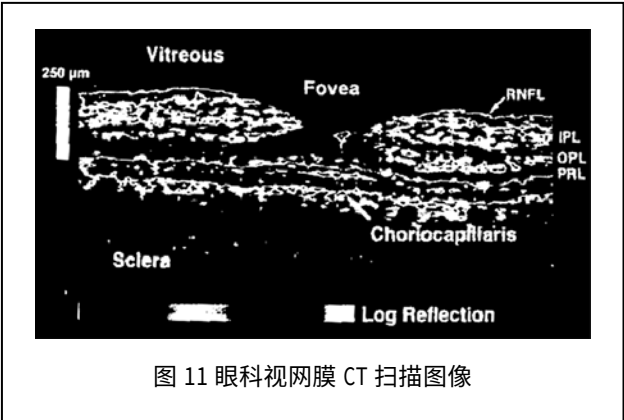


图 11 眼科视网膜 CT 扫描图像

光纤相干层析成像技术 (OCT) 主要应用于生物、医学、化学分析等领域, 如视网膜扫描、胃肠内视和用于实现彩色多普勒(CDOCT)血流成像等。其工作原理基于光的相干检测原理, 基本系统结构如图 10 所示。

OCT 为生物细胞和机体的活性检测提供了一种有效的方式, 世界上有许多国家都开发出相应的产品。图 11 为视网膜的 CT 扫描图像。德国的科学家近期推出了一台可用作皮肤癌诊断的 OCT 设备。此外, 利用 OCT 可以实现深度测量 (~1mm) 的优势, 已有实例应用于对生长中的细胞进行观察和监测中。

而 OPT 则面向工业工程—油井、管线等场所, 高精度地解决流体的过程测量问题。由于 OPT 所关心的是光线路径上的积分过程, 因此相关的系统集成设计、测量理论分析中的单元分割与信号处理都是关键。图 12 简单描绘了传统 OPT 的测量原理, 由于 OPT 具有适用于狭小的或不规则的空间、安全性高、测量区域不受电磁干扰以及可组成测量网络的多项长处, 为工业过程的安全测量提供了一种优良的手段。

2、智能材料

智能材料的提出和研究已有相当长的一段时间, 为业内人士所熟悉。智能材料是指将敏感元件嵌入被测构件机体和材料中, 从而在构件或材料常规工作的同时实现对其安全运转、故障等的实时监控。其中, 光纤和电导线与多种材料的有效结合是关键问题之一, 尤其是实现与纺织材料的自动化编织。美国南卡罗来那州立大学、佛吉尼亚理工大学和费城纺织学院都在此方面进行了大量工作。笔者曾参与由美国军方资助的预研项目智能型士兵 (SMART SOLDIER) 和智能型降落伞 (SMART PARACHUTE) 的研究。图 13 展示了一件嵌入光纤和电导线的背心^[7]。其中光纤和电导线的嵌入均已实现了自动化, 为智能型服装的商业化解决了又一难题。

智能材料作为桥梁、大坝等混凝土大型建筑的监测系统已在国内外多处工程中通过安装测试并付诸应用。此外, 智能材料在航空航天领域的应用也日趋广泛, 尤其是采用光纤光栅和光纤分布式应力、温度测量系统进行恶劣环境条件—高温、变形的多参量监测取得了明显的效果。图 14 勾勒出分布式传感器在航天领域多参量监测中的应用方案。

3、光纤陀螺及惯性导航系统

光纤陀螺 (I-FOG) 及惯导系统历经 25 年的发展, 目前已进入实用阶段。

从 1976 年 Vali 和 Shorthill 首次提出并实验验证 I-FOG 原理之后^[2]的五年间, 世界范围内的主要工作集中于基本结构的研究、结构小型化、开环和闭环结构的讨论等。图 15 显示出光纤陀螺的标准结构^[10]。

从 1980 到 1990 年的十年中, 对系统误差因子和光纤器件的研究取得了显著的进展, 新型的 SLD 光源、保偏光纤及耦合器的采用, 以及特殊的绕制技术为陀螺的实用化铺平了道路。上世纪 90 年代, 中级的 I-FOG 由于采用了消偏结构、3 轴 I-FOG、EDFA 光源等新型光纤器件和技术, 实现了成本降低、体积减小和性能提高目的, 并率先在航天及军事领域获得应用。例如, 美国 Honeywell 公司为美国军方制造的用于直升机的三轴惯导系统直径仅为 86mm。国际上有些高性能光纤陀螺的漂移指标已达到 $0.001^{\circ}/\text{hr}$, 许多产品已经投入民用飞机和汽车工业。未来光纤陀螺在工业领域应用还有更广阔的天地。

图 16 是日本 Mitsubishi Precision 公司和空间及宇航所为日本 M-V 火箭系统设计制造的惯导系统。

4、工业工程类传感器

传统的工业工程类传感器包括应用光纤的电光和磁光效应进行测量的电力工业用大电压、电流传感器。图 17 为加拿大 BC 水电站所安装 NXVCT 的照片。

利用光纤的弹光效应和 FBG 器件的应力传感器已被广泛应用于应力监测中。图 18 中为法国 Alstom 公司的铁路部 Transport S.A. 领导研制的一种安装了 FBG 的智能型新型复合材料的转向架^[10]。

在许多特殊场合—核工业、化工和石油钻探中都应用了监测传感系统。图 19 是安装了嵌入式 FBG 温度传感器阵列的发电机定子。光纤传感器系统正日益走向成熟, 并逐步融入日常的生产和生活之中。更多的应用和研究成果可参考 OFS 年会论文集^[10], 以及 SPIE 的相关专题会议论文。

四、新型光纤材料与器件

光纤通信的迅猛发展带动新型光纤器件和材料的不断涌现, 为光纤传感系统的开发提供了必要的基础。新型材料光纤和新型结构光纤前景看好。

以 SiO_2 材料为主的光纤, 工作在 $0.8\mu\text{m}\sim 1.6\mu\text{m}$ 的近红外波段, 目前所能达到的最低理论损耗在 1550nm 波长处为 $0.16\text{dB}/\text{km}$, 已接近石英光纤理论

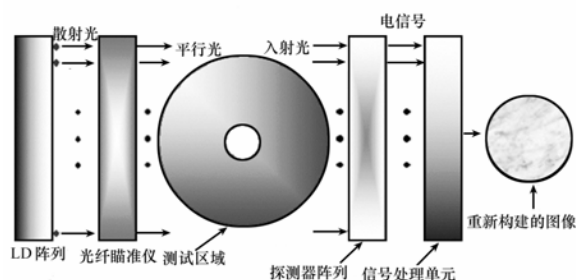


图 12 OPT 基本测量原理

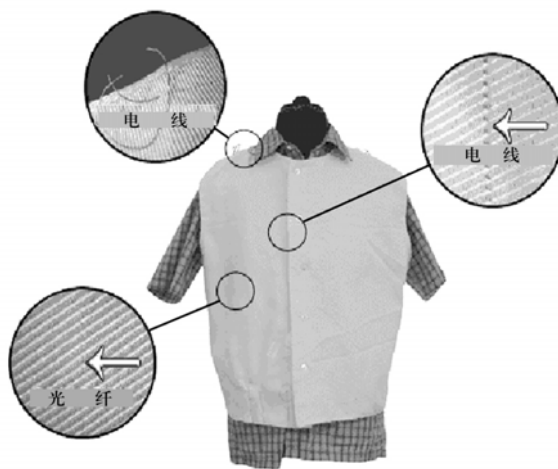


图 13 智能背心

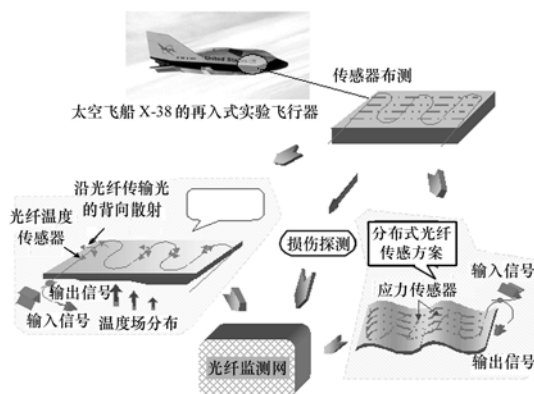


图 14 分布式应力、温度双参量传感系统

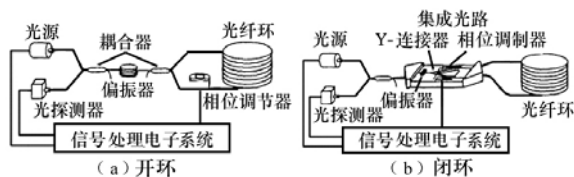


图 15 I-FOG 的标准结构

上的最低损耗极限,成为满足超宽带宽、超低损耗、

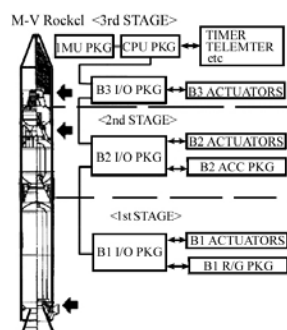
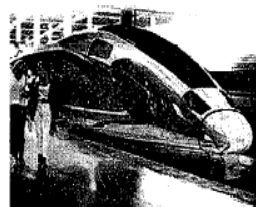


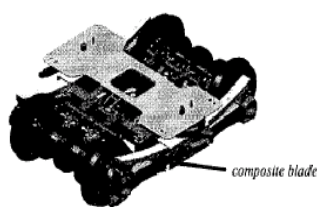
图 16 日本的 M-V 火箭惯导系统



图 17 安装于加拿大 BC 水电站的 Ingledow 站的 NXVCT



Alstom 列车

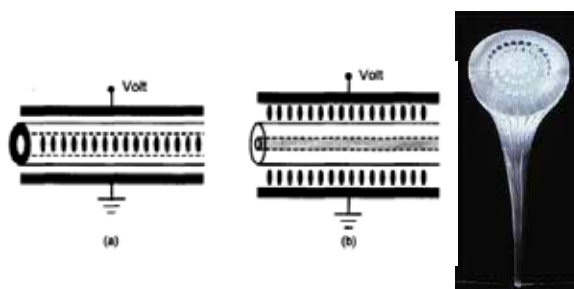


新的 Alstom 复合材料转向架

图 18 安装了 FBG 的智能型新型复合材料的转向架



图 19 安装嵌入式 FBG 温度传感器阵列的发电机定子



(a) 液晶芯光纤 (b) 液晶包层光纤 (c) 微细结构光纤预制棒

图 20 形态各异的新型结构光纤

高码速通信需要新型基体材料的光纤。

氟化物玻璃光纤是当前研究最多的超低损耗远红外光纤,其最低损耗在 $2.5\mu\text{m}$ 附近为 $1 \times 10^{-3} \text{dB/km}$,无中继距离可达到 $1 \times 10^5 \text{km}$ 以上。硫化物玻璃光纤具有较宽的红外透明区域 ($1.2\mu\text{m} \sim 12\mu\text{m}$),有利于多信道复用,其温度对损耗的影响较小,其损耗水平在 $6\mu\text{m}$ 波长处为 0.2dB/km ,是非常有前途的光纤。而且,硫化物玻璃光纤具有很大的非线性系数,用它制作的非线性器件,可以有效地提高光开关的速率,使开关速率达到数百 Gb/s 以上。重金属氧化物玻璃光纤具有优良的化学稳定性和机械物理性能,若把卤化物玻璃与重金属氧化物玻璃的优点结合起来,制造成性能优良的卤-重金属氧化物玻璃光纤,将具有重要意义。

特殊的应用环境对光纤有特殊的要求,石英光纤的纤芯和包层材料具有很好的耐热性,耐热温度达到 $400^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$,所以光纤的使用温度取决于光纤的涂覆材料。目前,梯型硅氧烷聚合物 (LSP) 涂层的热固化温度达 400°C 以上, 600°C 时的光传输性能和机械性能仍然很好。采用冷的有机体在热的光纤表面进行非均匀成核热化学反应 (HNTD),然后在光纤表面进行裂解生成碳黑,即碳涂覆光纤。碳涂覆光纤的表面致密性好,具有极低的扩散系数,而且可以消除光纤表面的微裂纹,解决了光纤的“疲劳”问题。

另一方面,光纤的结构决定了光纤的传输性能,合理的折射率分布可以减少光的衰减和色散的产生,并增加光能量的传输。随着光纤通信系统的迅速发展,出现了 DFF (色散平坦光纤)。为了 DWDM 系统能够在尽可能宽的可用波段上进行波分复用,各个公司都致力于消除 OH^- 吸收峰,已开发出的“无水峰光纤”,可实现 $1350 \text{nm} \sim 1450 \text{nm}$ 第五窗口的实际应用。美国 Lucent 公司开发出的 All Wave 光纤,克服了 OH^- 的谐波吸收,从而实现了 $1280 \text{nm} \sim 1625 \text{nm}$ 范围内完整波段的利用。为了适应相干通信系统的要求,已经研制出了“熊猫”型、“蝴蝶结”型和“扁平”型的高双折射保偏光纤,另外具有“边坑”型的单模单偏振保偏光纤,以及正在研究中的蜂窝型波导光纤^[9]、液晶光纤 (见图 20) 等等,这些都将成为光纤传感器的发展提供更加广泛的选择。

五、结束语

随着光电子技术近年来突飞猛进的发展,光纤传

感技术经过二十余年的发展也已获得长足的进步,其主要体现在:

1、进入实用化阶段,逐步形成传感领域的一个新的分支

不少光纤传感器以其特有的优点,替代或更新了传统的测试系统,如光纤陀螺、光纤水听器、光纤电流电压传感器等;出现一些应用光纤传感技术的新型测试系统,如分布式光纤测温系统,以光纤光栅为主的光纤智能结构;改造了传统的测试系统,如以光纤构成的新型光谱仪;利用电/光转换和光/电转换技术以及光纤传输技术,把传统的电子式测量仪表改造成安全可靠的先进光纤式仪表等等。

2、新的传感原理不断出现,促进了科学技术的发展

例如,光纤传感网络的出现,促进了智能材料和智能结构的发展;波长调制型光纤光栅多参量测试系统的出现,促进了多参量传感系统的发展;光子晶体光纤(多孔光纤 Photonic Crystal fiber)用于传感的可能性促进了光子晶体年的发展等等。

虽然如此,光纤传感技术的现状仍然远远不能满足实际需要,还有许多有待研究的课题:

①传感器的实用化研究。提高传感系统,尤其是传感器的性价比;

②传感器的应用研究。在现有的科研成果基础上,大力开展应用研究和应用成果宣传;

③新传感机理的研究,开拓新型光纤传感器;

④传感器用特殊光纤材料和器件的研究。例如:增敏和去敏光纤、荧光光纤、电极化光纤的研究等。

这一切都需要科研人员不断的努力。

参考文献

- [1] K.O.Hill, Y.Fujii. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication[J], Appl. Phys. Lett., vol.32, p.647,1978
- [2] A.D.Kersey, M.A.Davis. Fiber grating sensors[J], J.Lightwave Technol., vol.15, n.8, p1442-1463, 1997
- [3] S.M.Melle, K.Liu. A passive wavelength demodulation system for guided-wave Bragg grating sensors[J], IEEE Photon. Technol. Lett., vol.4, p.516, 1992
- [4] T.A.Berkoff et al. Hybrid time and wavelength division multiplexed fiber grating array[J], Proc. SPIE, vol. SPIE-2444, p.288, 1995
- [5] H.J.Patrick, G.M.Williams. Hybrid fiber Bragg grating/long period fiber grating sensor for strain/temperature discrimination[J], IEEE

Photon. Technol. Lett., vol.8, p.1223-5, 1996

[6] A.M.Vengsarkar, P.J.Lemaire. Long-Period fiber gratings as band-rejection filters[J], Tech.Dig.Cof.Opt.Fiber Commun.,San Diego, CA, 1995, postdeadline paper PD4-2

[7] <http://www.photonicslabs.com/products>, [EB/OL]

[8] <http://www.omni-guide.com/publications>, [EB/OL]

[9] <http://www.micronoptics.com/si425>, [EB/OL]

[10] OFS2002, 15th Optical fiber sensors Conference Technical Digest[C], May,2002, Portland, OR, USA [编者注:相关资料可参见 <http://ieee.org/organizations/societg/leos/leosconf/oFs/oFshtml>]

The Development Of Optical Fiber Sensors

Abstract: The development of optical fiber sensors is introduced in this paper. The study on the principles of optical fiber sensors and the applications of optical fiber sensor products are described, and the optical fiber tomography, the smart materials, optical fiber gyro and the other fiber sensors used in industry are including in this, the fiber grating, the technology of distribution optical fiber sensors, and optical fiber sensor network are including in that. At last some new materials used in optical fibers are introduced.

Keywords: technology of optical fiber sensors(OFS); development of OFS; applications of OFS

作者简介:

廖延彪,清华大学电子工程系教授,博士生导师,从事光纤传输和传感工作二十余年。参与过国家“《六五》”,“《七五》”,“《八五》”重点攻关计划中有关激光检测和光纤传感技术课题规划的制定,承担过国家“《六五》”,“《七五》”,“《五》”重点攻关项目:“光纤大电流传感器”,“光纤高压传感器”,“高精度光纤油罐检测系统”,国家海洋 863 重大项目,以及国家自然科学基金和航天基金等。获得国家发明奖、国家科技进步奖、以及部级奖多项。出版过《物理光学》、《光纤光学》、《偏振光学》、《导波光传感器:原理与技术》等著作。目前正从事光纤传输和传感方面的原理和应用研究,例如,光纤光栅传感网,光纤层析技术,以及用于测量温度,压力,振动,位移等光纤传感器的研制。

通讯地址:北京清华大学电子工程系

联系电话:010-62781372

邮编:100084

E-mail:lyb-dec@mail.tsinghua.edu.cn

黎敏,博士后,主要从事光纤传输和传感技术的研究。

• 本文编辑:李晓延 读者服务卡编号 001□