

《双向阵列光纤光栅复合传感系统研究》项目总结报告

一、项目概况

项目名称：双向阵列光纤光栅复合传感系统研究

立项时间：2015 年

项目编号：BY2015070-01

项目负责人：柏宁丰、孙小菡

合作企业：江苏俊知通信股份有限公司

经费情况：

经费单位：万元

项目来源	江苏省产学研前瞻性联合研究项目			
项目编号	BY2015070-01			
项目名称	双向阵列光纤光栅复合传感系统研究			
经费投入		经费支出		
来源	投入数	科目	支出数	其中：省拨款支出数
投入合计	139.7	支出合计	139.155887	29.455887
1、省拨款	30.00	(一) 直接费用	130.455887	24.455887
2、部门、地方配套	0	1、设备费	63.67	3.27
3、合作单位自筹	109.7	(1) 设备购置费	52.8	1.3
4、其他来源		(2) 设备试制费	8.9	0
		(3) 设备改造与租赁费	1.97	1.97
		2、材料费	26.128778	2.928778
		3、测试化验加工费	13.63	0.43
		4、燃料动力费	2.08041	2.08041
		5、差旅费	9.058	5.758
		6、会议费	1	0.1
		7、国际合作与交流费	1.1	0
		8、出版/文献/信息传播/知识产权事务费	5.086449	5.086449
		9、劳务费	4.49225	4.49225
		10、专家咨询费	0	0
		11、其他支出	4.21	0.31

		(二) 间接费用	8.7	5.00
		其中: 绩效支出	4.95	1.25
经费结余		0.544113		

主要研究内容:

本项目提出,面向物联网、通信网对单根光纤温度/压力传感的需求,在江苏俊知通信有限公司与东南大学光传感/通信综合网络国家地方联合工程研究中心联合承担的“光传感/通信一体化有源光电传输系统关键技术研究”所获得的科研基础和成果上,开展单根光纤温度/压力复合传感阵列技术研究。主要目的在于:

(1) 建立单根光纤温度与应力复合传感理论模型,分析温度与应力交叉敏感性能;

(2) 建立单根光纤大容量 FBG 分析模型,优化设计单根光纤大容量 FBG 阵列;

(3) 研制单根光纤温度/压力复合传感系统。

本项目要重点解决的关键技术为:

(1) 寻找克服温度与应力交叉敏感,实现单根光纤检测温度与应力的理论模型;

(2) 寻找 FBG 结构,实现单根光纤大容量 FBG 阵列;

(3) 设计系统结构,实现单根光纤温度/压力复合传感系统。

二、项目实施情况

2.1 校企联合研发团队的组织

东南大学在 2013 年与江苏俊知光电通信有限公司在光纤光栅传

感及光缆技术领域开展技术交流与合作。2014 年成功申报了江苏省产学研合作项目。在此基础上，本项目应用传感通信一体化有源光电复合缆工艺技术，探索利用同一光纤进行温度与压力的检测，构成光纤光栅传感及组网技术，实现传感网与通信网的有机结合。本项目研究工作自 2015 年 7 月开始启动。为了项目的开展和高质量实现研发目标，首先组织了完善的校企联合研发团队。东南大学成立了 3 名教授、1 名副教授、2 名讲师和多名博士生为主的强大研发团队。团队中包含了在光通信领域中的全国知名专家，又包括数名多年从事光通信研究的海外回国人员。整个人才队伍年龄结构完整。江苏俊知光电通信有限公司也组成了相应的研究团队。团队中既有从事产品研发的工程技术人员，具备技术成果接受和转化能力，又有从事企业管理和市场销售的专业人员，为未来产业化打下基础。

至 2017 年 12 月完成理论与实验工作。2017 年 7 月第三方测试结果达到了项目原定技术指标。

2.2 实施计划的制订与落实

本研究自 2015 年 7 月开始启动以来，制定了完善的实施计划。按照合同规定的研究目标、内容，以每 6 个月为一个研究周期，检查落实。同时，东南大学与江苏俊知光电通信有限公司研究团队每 2-3 周定期召开项目汇报与协调会议，及时解决项目研究过程中的问题。

2017 年 6 月已制备出双向阵列光纤光栅复合传感光纤样品。目前该类技术尚无国家标准与制作方案。因此，我们增加了双向光纤光栅制作技术研究内容，在实验室内建立了实验制作系统，2016 年 12

月进行了制作测试。2017 年 1-6 月，重点研究该复合传感光纤功能与技术指标的确定方法与验证手段。2017 年 7 月委托第三方检测机构检测。至此，本项目完成了合同规定的各项内容与技术指标。

2.3 企业研发人员的培养培训

本研究自 2015 年 7 月开始启动以来，开展了大量并且完善的企业研发人员的培养培训。首先，确定培训课题：FBG 光栅技术、压力与温度传感检测技术以及基于复合传感光纤光栅的检测系统研发。然后，确定培训课题的详细内容；结合俊知光电通信公司的愿景和复合传感光纤光栅研发的需求，确定了详细的培训内容。最后，实施培训，使得企业参与培训的研发人员充分了解了双向温度/压力复合传感光纤光栅的原理与技术内涵，掌握了 FBG 光栅刻写技术，已可熟练操作 FBG 光栅刻写平台的全部装置与设施。获得公司领导和研发人员的认可。

2.4 项目完成情况评价及预算执行情况

本研究自 2015 年 7 月开始启动，至 2017 年 6 月完成双向温度/压力复合传感光纤光栅样品制作，通过系统联调与测试，第三方测试结果达到了项目原定技术指标。

在研制过程中我们提出了多项创新思想和技术，授权发明专利 3 项，申请发明专利 5 项，发表了 5 篇高水平论文，自主研制了双向温度/压力复合传感光纤光栅制作装置 1 套。

项目总经费 135 万元，其中省拨款 30 万元，江苏俊知光电通信有限公司承担 105 万元。项目执行期间，按照财务预算实施研究，经

费使用合理。2018 年 6 月 20 日止，已使用 139.155887 万元，其中省拨经费使用 29.155887 万元，结余 0.544113 万元。结余部分主要用于专家评审等。

三、项目技术情况

3.1 项目的研究方法及技术路线

3.1.1 总体方案考虑

光纤布拉格光栅（FBG）传感器因其体积小、质量轻、耐腐蚀、抗电磁干扰、低成本、能够测量温度与应变，精度高，调解速度快和与普通光纤兼容等优点被广泛应用在航天航空、军事装备、建筑结构、强场探测、地震监测和石油矿井等场所。

然而，由于FBG存在温度与应变的交叉敏感问题，使得同时准确测量温度与应变成为工程应用中的难题。尽管双周期FBG、FBG级联、倾斜FBG、超结构光纤光栅、FBG写入特殊结构等方法已获得一些实验结果，但这些方法有的结构比较复杂，制作工艺要求高；有的损耗较大，不利于长距离和分布式传感；难以满足移动通信传感网络的需求。随着通信行业的技术发展及产品升级，应用环境越来越复杂，对通信接入安全保障和工作状态的监控及各项传输性能要求越来越高，从而对使用同根光纤进行温度与应变同时检测的准分布式传感网路的需求也越来越迫切。必须探究单根光纤光栅对温度/压力敏感关系，建立理论模型，找到实现复合传感的途径。

本项目提出，面向物联网、传感网、通信网对单根光纤温度/压力传感的需求，在江苏俊知通信有限公司与东南大学光传感/通信综

合网络国家地方联合工程研究中心联合承担的“光传感/通信一体化有源光电传输系统关键技术研究”所获得的科研基础和成果上，开展单根光纤温度/压力复合传感阵列技术研究。主要目的在于：

（1）建立FBG对温度与应力交叉敏感的电磁场与波理论分析模型，探究引起该现象的物理起因，寻找解决FBG温度与应力交叉敏感的方法；

（2）提出了FBG温度/应变复合传感方案，仿真分析与验证该方案的可行性；

（3）研制与建立特种FBG刻写平台，探究可靠的实验参数，开展特种FBG刻写试验；

（4）设计单根光纤温度/压力传感系统结构，实验验证方案的可行性；

（5）开拓特种FBG传感应用领域，研究FBG传感器工程应用技术。

因此，本项目研究工作围绕光纤光栅温度/应变传感理论建模、光纤光栅温度/应变复合传感器方案与优化设计、特种光纤光栅制备平台研制、光纤光栅温度/应变传感器实验研究、特种 FBG 传感应用五个方面展开。

3.1.2 光纤光栅温度/应变传感理论模型

已知FBG受外界温度和应变作用，其周期、有效折射率等参数会发生变化，引起FBG谐振波长及谱特性改变。因此测量FBG反射谱峰值波长漂移或谱特性变化量，便可知外界综合物理量标值。区分外界温度与应变对FBG谱特性影响，需分别研究温度、应变对FBG光谱特性的影响关系，从中找到区分途径。

（1）温度传感模型

温度引起 FBG 反射峰中心波长漂移的主要原因包含：光纤热光效应、热膨胀效应和因光纤内部热应变引起的弹光效应。为了简化起见，假设：（1）仅考虑裸光纤，且只研究光纤自身热效应，忽略其他外在因素对 FBG 的影响；（2）仅考虑热光效应的线性热膨胀区；（3）在考虑的波长与温度范围内，认为热光系数是一常数；（4）不考虑温差效应，假定温度的空间分布是均匀的。

一般，对于掺锗的石英光纤，当 $\lambda_B=1550\text{nm}$ 时，FBG 温度灵敏度 $K_T=10.8\text{pm}/^\circ\text{C}$ 。所以在一定范围内，FBG 反射峰中心波长漂移正比于温度，当温度升高时，向长波长方向漂移。

（2）应变传感模型

一般情况下，FBG 为各向同性的圆柱体结构，受到横向、轴向应变后，反射峰中心波长发生漂移。为简化 FBG 应变传感模型，假设（1）FBG 在应变范围内为一个理想的弹性体，遵循胡克定律；（2）FBG 的折射率变化在横截面上均匀分布，且不会影响光纤自身的各向同性；（3）FBG 对横向应变的敏感度很小，仅考虑均匀轴向应变对 FBG 中心波长漂移量的影响。

因此当温度不变时，中心波长为 $\lambda_B=1550\text{nm}$ ，FBG 轴向应变灵敏度 $K_s=1.21\text{pm}/\mu\epsilon$ 。可见 FBG 反射峰中心波长偏移量正比于轴向应变，轴向拉升光纤时，向长波长方向漂移。

（3）温度/应变交叉敏感机理

目前主要有两种方法来解决温度和应变交叉敏感问题，一是，

温度补偿方案，其原理是通过某种方法抵消由温度引起的 FBG 中心波长的漂移，使得应变测量不受环境温度影响；二是，温度和应变双参数同时测量方案，通过两个参量共同对温度和应变进行编码，通过解联立的方程组求得温度和应变的变化。

对于温度和应变变化同时存在时，可通过方程联立求解。

3.1.3 光纤光栅温度/应变复合传感器方案与优化设计

(1) 温度/应变复合传感机理

考虑到光纤光栅的不仅有功率谱，还有相位信息，通过光纤光栅中时延随温度和应变的变化，可以得到另一条温度和应变的信息。提出了基于 FBG 反射谱中心波长漂移与主旁瓣边缘时延变化的温度/应变复合传感方案。

根据 FBG 温度、应变传感理论模型可知，温度或应变的变化导致 FBG 反射谱中心波长发生漂移。同时，FBG 透射谱最大时延也近似与温度和应变成线性关系。随着温度或应变的增加，FBG 的中心波长发生漂移，根据 FBG 的温度/应变传感模型可知，通过 FBG 的中心波长偏移可以得出一个关于温度和应变变化的方程。

随着温度和应变的增加，FBG 的时延谱也发生变化，其时延谱的中心波长与透射谱一致，向长波长方向漂移，其主旁瓣边缘出现时延的最大值，称其为最大时延，也随着温度和应变的增加而线性增大。

(2) 仿真程序编制

常用熔融石英光纤来制作 FBG，石英光纤的热膨胀系 $\alpha_\Lambda = \frac{1}{\Lambda} \left[\frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right] = 5.5 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$ ，热光系数 $\alpha_n = \frac{1}{n_{\text{eff}}} \left[\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} \right] = 6.4 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ，有效弹光系数 $p_e = -\frac{1}{n_{\text{eff}}} \left[\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial s} \right] = 0.217$ ，根据温度和应变传感模型，假设温度和应变只对光纤的周期及有效折射率产生影响，且为均匀线性影响。因此可分别计算温度、应变对 FBG 周期和有效折射率的影响。设定 FBG 的初始状态参数 n_{eff} 、 L 、 $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 和 Λ ，分别求得不同温度和应变下的有效折射率、周期和长度变化的值，再分别以变化后的 FBG 参数进行仿真计算，求得相应的中心波长和最大时延，从而得出温度和应变分别与 FBG 中心波长和最大时延的变化关系。

(3) 均匀FBG温度/应变复合传感优化设计

a. 光纤光栅长度对温度/应变敏感系数的影响

随着 FBG 长度增加，FBG 最大时延的温度灵敏度整体趋势是逐渐增加。有效折射率变化量 n_{eff} 较小的 FBG，较小长度时温度灵敏系数为正，之后为负数。这是由于温度升高，FBG 的 n_{eff} 和周期 Λ 都在变大，此外，有效折射率变化量 $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 越大，最大时延的温度灵敏系数变化趋势越快。因此，增大 FBG 长度和 $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 可以增加最大时延的温度灵敏度。

b. 光纤光栅有效折射率变化量对温度/应变敏感系数的影响

FBG 中心波长与其有效折射率变化量 $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 有关，FBG 长度为 1cm，周期为 535.517nm 的不同 $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ FBG 中心波长随温度和应变变化的曲线。可以发现 FBG 的中心波长都是随温度和应变线性变化的，其温度和应变灵敏系数与 $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 无关， $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 只是改变量 FBG 初始状态的中

心波长，相同条件下，FBG 的 $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 越大其中心波长越大。

FBG 长度和 $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 较大时，FBG 最大时延的温度灵敏系数为负数，且随着 $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 的增大，逐渐变小，即灵敏度增加。FBG 最大时延的应变灵敏系数为正值，随着 $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 增大，其灵敏系数逐渐增加，并且 FBG 长度越大，其最大时延应变灵敏系数的变化趋势越快。

3.1.4 特种光纤光栅制备平台研制

(1) 光纤光栅刻写系统

研制了一套完整相位掩模法 FBG 刻写系统。该平台由 248 nm KrF 准分子激光器、FBG 刻写光路、相位掩模板、成栅监测系统以及 FBG 的退火系统组成。核心设备为美国相干公司 COMPEXPro110 准分子激光器，可发射良好的空间相干性、较高能量的紫外脉冲，满足常规单模 FBG 以及大芯径特种 FBG 刻制。激光脉冲整形光路固定在一个独立的精密隔振平台上，通过可调节光阑调节光斑大小，利用两面共焦柱面镜组成扩束镜，对光斑进行准直，再由柱透镜汇聚激光能量，提高脉冲单位能量。变迹幅度模块用于砌趾光纤光栅的制作。调节光斑宽度的光阑可控制光纤光栅长度。相位掩模板上是光纤光栅成栅的关键部件。光纤光栅成栅监测系统用以实时监测光纤光栅的“生长”状况，主要由型号为 AQ6370D 的光谱分析仪、SLED 全带宽光源和环形器等组成。

准分子激光器的工作波长与工作气体有关，由于掺锗光纤将在 195nm 和 240nm 产生两个较强的紫外吸收带。因此利用光纤光敏性制

作光纤光栅的光源通常采用 193nm ArF 和 248nm KrF 准分子激光器。COMPexPro110 准分子激光器工作波长为 248nm，最大脉冲能量为 200mJ，最大重复频率为 100Hz，平均功率为 15W，脉冲宽度为 20ns，光斑尺寸 $23\text{nm}\times 9\text{mm}$ ，时间相干长度为 $2\text{ }\mu\text{m}$ ，空间相干长度为 $600\text{ }\mu\text{m}$ 。该激光器是一个封闭的激光系统，只由留有一些接口与外界交互，工作气体为 0.12%氟气、2.30%氦气、3.03%氩气、94.55%氖气混合气体及纯度 99.995%氦气。激光器控制面板可以控制激光脉冲的发射和停止，可以设置脉冲的能量和频率，可以切换激光器的两种工作模式（恒电压模式和恒能量模式）。为了得到较高的脉冲能量和较快的刻写速率，通常要设置激光器处于高电压和高频率的工作模式，由于长时间处于这种状态下，激光器内部会因为温度过高，而影响激光器的稳定和使用寿命。因此为激光器提供了一套水冷装置，对激光器的内部进行降温，使其保持稳定的工作状态，延长激光器的使用寿命。

FBG 刻写光路将紫外激光发射的 $23\text{nm}\times 9\text{mm}$ 光斑汇聚为 $2\text{mm}\times 3\text{mm}$ ，从而使得能量汇聚到光纤上制备出高质量的 FBG。为了降低激光器振动对光路的影响，分别将激光器和光路放置在两张隔振平台上。其主要包括紫外激光光路模块、相位掩模板调节模块、光纤夹持模块。准分子激光器发射口位置较高，不利于光路稳定，且激光器发射光束截面呈竖直矩形，不适合对水平放置的光纤操作。因此，通过 45° 248nm 波长反射镜将激光器射出的截面为竖直矩形的光束转变为水平矩形的光束，使其适合对水平放置的光纤进行曝光。然后使反射的光束通过一个二维可调光阑，通过调节光阑来对光束进行整形，控制激光器

照射的宽度，当需要制定小于掩模板栅区长度的 FBG 时，可以通过改变光阑的宽度来实现。再使通过扩束镜对光束进行准直，有利用聚焦镜获取细小高功率密度光斑。幅度变迹模块由电脑控制的电动位移台和镂刻砌趾函数形状的砌趾板构成，实现砌趾光纤光栅刻写。最后使得光束垂直通过聚焦镜，对光束进行聚焦，使得激光能量能够较为集中地垂直照射在相位掩模板的栅区对光纤进行曝光。

(2) 光纤光栅刻写核心部件

a. 相位掩模板

相位掩模板是由高质量熔融石英衬底上周期性凹槽组成的一种衍射光学器件，采用电子束法或全息法制备。通过合理的设计相位掩模板的凹槽深度和占宽比可以很好的压制零级和增强一级衍射。通常将相位掩模板的槽深和占宽比分别控制在 $230\text{nm}\sim 280\text{nm}$ 、 $0.48\sim 0.65$ 的范围内可以保证零级衍射效率小于 5%和 ± 1 级衍射效率大于 35%。被曝光的光敏光纤紧靠相位掩模板，其纤芯折射率受到衍射条纹的周期性调制，其形成的 FBG 的周期也等于衍射条纹的周期，为相位掩模板的一半。 1550 nm 波段通信光纤传输损耗低，适合构成长距离传感，可得相位掩模板周期。

实验中采用相位掩模板和光纤调节模块用来调节相位掩模板与待刻写光纤的位置。该模块由固定在底座上二维调节架和用于夹持相位掩模板的夹持器构成。光纤夹持器与相位掩模板夹持器固定在同一个底座上，由光纤夹持和拉力调节两部分组成，光纤夹持由两个夹持凹槽组成，其中一个凹槽固定，而另一个凹槽与拉力计连接，可以通

过拉力计的示数控制光纤拉力的大小。相位掩模板 1 周期 1072.5nm, 栅区尺寸为 10 mm × 20 mm, 0 级衍射为 2.6%, +1 级衍射为 35.8%, -1 级衍射为 35.8%。

b. 光纤光栅成栅监测系统

搭建了 FBG 成栅监测系统, 该系统主要由宽带光源、光谱分析仪、环形器、活动连接头等组成。光谱分析仪为 Yokogawa 公司 AQ6370D 光谱仪, 动态监测范围为 600 nm~1700 nm, 最小分辨率为 1pm, 最小波长分辨率可达 0.02nm。采用深圳浩源光电子有限公司 SLED 全带宽光源, 其工作波长为 1250 nm~1650 nm。

SLED 宽带光源发出宽带光, 从环形器口 1 进入, 从环形器口 2 射出, 入射到正在写制的 FBG 上, 根据 FBG 波长反射原理, 满足布拉格条件的波长被反射回去, 由环形器口 2 进入, 从环形器口 3 射出, 此时若将光谱仪的接口 1 与接口 2 连接即可以观测到刻写 FBG 的反射谱, 若将光谱仪接口 1 与接口 3 连接则可以观测刻写 FBG 的透射谱。

(3) 光纤光栅退火系统

为了提高光纤的光敏性, 制备 FBG 光纤要经过高压载氢处理。高压载氢光纤在紫外曝光后纤芯中游离氢分子和锗氧缺陷发生反应, 引起纤芯折射率改变。使用载氢光纤制作 FBG 时, 为了保证 FBG 在实际应用中的稳定性需要对其进行退火处理。这样可以加快逸出纤芯和包层中的氢分子, 使得纤芯和包层的折射率回复稳定值。此外, 退火处理还会破坏 FBG 写入后纤芯中形成的一些不稳定的 Ge-OH 和 Si-OH 键, 释放在制作过程中 FBG 受到的微小应变, 使 FBG 的折射率变得稳

定,但是也会使得纤芯的折射率有所降低。为了对刻写的 FBG 进行退火处理,使其具有更好的稳定性,实验采用上海沪升仪器的恒温炉,退火操作为将刻写好的 FBG 置于恒温炉中(温度一般为 $120^{\circ}\text{C}\sim 130^{\circ}\text{C}$)烘烤 12 小时左右。

(4) 基于相位掩模法的FBG制备工艺

FBG 制备工艺参数是决定 FBG 制作质量的关键因素,找出其对 FBG 性能的影响,对研制特种 FBG 传感器尤为重要。研究了激光脉冲、预置应变、退火等对 FBG 性能的影响。确定了工艺流程与参数。工艺流程如下:

- 打开激光器,激光器有一段自动预热时间,检查各个镜片是否清洁,若有灰尘要将其清除,以免激光照射镜片时损伤镜面。
- 将所需的相位掩模板竖直放置在相位掩模板的夹持模块上,将砌趾模块的遮挡板移除,调节光路使得紫外光束垂直地照射掩模板。
- 取一根长度适中的载氢光纤,将其中间一段约 30mm 长的涂覆层剥去,并使其正对着相位掩模板,使紫外光能够垂直地照射掩模板衍射在载氢光纤上,将光纤固定在光纤夹持架上。为了确保刻写部分的光纤不弯曲,光纤夹持时需要给其施加一定的拉力,但过大的拉力会使得光纤断裂,因此最大拉力不要超过 100g。此外,刻写时施加拉力可以小范围地改变制得 FBG 的中心反射波长。
- 调节相位掩模板于光纤的距离,使其间距大约 $30\text{ }\mu\text{m}$ 。
- 将光纤的两端剥去涂覆层,接入活动连接头,并通过法兰和跳线进行光路连接,以实时监测 FBG 制备。

- 打开激光器，通过激光器控制面板调节电压，设置所需脉冲的能量和频率，通过监测系统观察和控制 FBG 的刻写。

3.1.5 光纤光栅温度/应变传感器实验研究

在所建 FBG 制备平台上刻写了若干 FBG，此处研究其温度、应变综合传感性能。

(1) 温度对FBG光谱的影响

取一根实验制得的 FBG 建立实验系统。从水温为 60℃开始测量记录 FBG 的透射谱，每隔 5℃记录一次，直到温度降低到 30℃，共 7 组数据。实验结果表明随着温度的升高，FBG 的中心波长向长波长的方向偏移，其偏移量与温度成线性关系，温度系数为 10.41pm/℃，而 FBG 的透射率和 3dB 带宽基本不受温度影响。

(2) 应变对FBG光谱的影响

再以同 FBG 连接光路，光栅的一端被加持在光纤加持架上固定，另一端被加持在拉力计上，该拉力计被固定在一个二维调节架上，可通过旋转螺母使调节架产生微小的位移，从而使光栅产生轴向的应变，并且拉力值可直接从拉力计上读取。拉力计示数从 20g 开始，水平移动调节架增大光栅的轴向应变，拉力计示数每增加 10g，记录一次位移量和 FBG 的透射谱，共九组数据。实验结果可以看出随着拉力的增加，FBG 的中心波长向长波长的方向偏移，其偏移量与应变成线性关系，灵敏系数为 0.01457nm/g (1.17pm/ $\mu\epsilon$)，而 FBG 的同样基本不受应变影响。

(3) FBG温度、应变传感器

采用单端金属封装形式构成光纤光栅温度、应变传感器。温度量程-40~200℃，测量精度为±0.5℃，光栅中心波长 1525~1565nm，可进行埋入/表面安装；应变测量范围±1500με，精度±0.3%F.S.，光栅中心波长 1525~1565nm。

HKA-M200 系列光纤光栅解调仪是上海汉昆光电科技有限公司推出的一款高速并行，大容量的光纤光栅解调设备，适用于光纤光栅温度、应变、压力、位移等多种类型的光纤光栅传感信号解调和传感数据采集。HKA-M200 系列光纤光栅解调仪以大功率激光作为信号源，采用高速多通道并行光探测技术，使得光源的输出功率高达 85%以上，可对工程现场光纤传输线路损耗或光分路器级联损耗导致的微弱光纤光栅传感器进行准确检测，远程监控能力可达 40km。HKA-M200 系列光纤光栅解调仪具有 1-64 个同步测量通道，同步扫描频率可在 1~50Hz 之间设定，波长测量范围为 1525nm~1565nm，在工作温度范围内可保证±3pm 的测量精度，并且配有以太网口、RS232 等常用数据接口，因此满足了光纤光栅传感器系统指标。

3.1.6 特种 FBG 传感器应用

此传感器已在以下三种场合获得应用：

- (1) 在江苏俊知光电通信有限公司“光传感/通信一体化有源光电传输系统的研发及产业化”省科技成果转化资金项目中，取得较好的效果；
- (2) 用于光分配网（ODN）链路监测系统中，构成 FBG 二维编解码；
- (3) 用于某核心真空电子器件管内温度以及核心部件夹持特性检测，

为 xx973 项目的完成提供了技术手段。

(1) 光传感/通信一体化有源光电传输系统与复合光电传感缆

该传感器用于江苏俊知光电通信有限公司承担的“光传感/通信一体化有源光电传输系统的研发及产业化”省科技成果转化资金项目中。本项目通过对传感、馈电、通信一体化有源光电传输技术的关键共性问题的综合分析研究，以温度/应力光纤光栅传感器作为检测前端，传感器将反应铁塔结构形变程度，及所处的环境温度等物理量转换为一定波长的光信号，通过有源光缆传输给地面的区域监控中心。采用ARM+Linux为核心的嵌入式系统作为区域监控中心的开发平台，硬件架构主要由 ARM核心板模块，可扩展外部存储模块，显示模块，键盘输入模块，报警模块，光纤光栅解调仪组成。搭建ARM+Linux开发平台，并在此平台下运行光纤光栅数据分析处理前台应用程序和web后台服务。

(2) 光分配网（ODN）链路监测系统中，构成FBG二维编解码

采用光分路器与 FBG 的级联，可以构建远端光编码器，实现在光分配网远端 N 处光分路与编码的同时进行。同时要尽量减少 FBG 对温度、应变的敏感性，通过该编解码器反馈的信号，在 ODN 局端进行信号处理。因此，我们研制了基于多个分光比为 50:50 的 1×2 光分路器与高反射率（通常大于 95%）FBG 构建的 FBG 级联光编码器。

本项目研制的特种 FBG 制备平台，给出了具体制备级联 FBG 阵列的工艺与完整的流程。我们研制出 64 用户二维光正交码编码器。经测试，单只光编解码器制作时间 < 4 分钟；光纤光栅距离误差 $< 2\text{mm}$ ；光纤光栅中心反射波长误差 $< 0.2\text{nm}$ 。按照通信行业标准，由江苏省

质量技术监督通信产品质量检验站完成了对所制备的二维光正交编码器的检定测试。分别测试可实现的检测区域、多用户分支光编码功能、编码器光功率代价、32/64 用户光纤光栅数以及等距用户的区分功能或技术指标，均达到合格。

(3) 某核心真空电子器件管内温度以及核心部件夹持特性检测

螺旋线行波管是一种宽频带、高功率的微波器件，在通信、雷达和电子对抗系统中具有广泛的应用。慢波结构是螺旋线行波管中能量交互的关键部件，其性能直接决定了整管性能的优劣。行波管的散热能力对行波管的输出功率和工作寿命有直接影响，合理的热结构设计能够有效提高行波管的可靠性。我们基于本项目已实现的 FBG 制备平台，研制了特种 FBG 温度传感器，实现以下两种特殊应用。

a. 管内温度测试

目前对于螺旋线行波管的热分析常采用数值模拟仿真的方法，难以完全逼真的反映螺旋线的客观状况。高温光纤光栅具有抗电磁干扰、灵敏度高、尺寸小、重量轻、成本低、适用于高温、腐蚀性等环境中使用的优点，为螺旋线热分析提供了一种新的思路。采用在行波管管内放置特种 FBG 温度传感器的方法，用以测量管内温度。我们提出并仿真验证了在夹持杆侧面台阶处放置光纤光栅对慢波结构高频特性影响较小，因此，放置高温光纤光栅温度传感器可用于测量管内温度。我们研制出高温光纤光栅传感器，制备了行波管样管，实现了管内温度测试。

b. 螺旋线夹持性能检测

慢波结构散热特性的优劣取决于组件夹持特性，由螺旋线与夹持

杆、夹持杆与管壳间的接触热阻表征。各种常规手段难以确定其特性。由于螺旋线直径较小，传统的温度传感器难以检测其温度分布。提出了基于微型 FBG 分布式温度传感阵列的螺旋线慢波结构夹持特性测试手段与方法。基于本项目研制的特种 FBG 制备工艺平台，在一根光纤中实现了 FBG 传感器阵列。构建了螺旋线慢波结构夹持特性快速、准确的测试，并且不对器件产生任何影响。基于该方法设计了夹持性能测试实验平台，利用 ANSYS 分析论证了实验平台的正确性和可靠性，搭建了测试系统，并完成了对样管的测试。

3.2 项目解决的关键技术

本项目围绕面向物联网、传感网、通信网对单根光纤温度/压力传感的需求，在江苏俊知通信有限公司与东南大学光传感/通信综合网络国家地方联合工程研究中心联合承担的“光传感/通信一体化有源光电传输系统关键技术研究”所获得的科研基础和成果上，开展单根光纤温度/压力复合传感阵列技术研究。研究工作围绕光纤光栅温度/应变传感理论建模、光纤光栅温度/应变复合传感器方案与优化设计、特种光纤光栅制备平台研制、光纤光栅温度/应变传感器实验研究、特种FBG传感应用五个方面展开。

东南大学课题组与江苏俊知公司技术人员通力合作，集中攻关，解决了以下关键技术：

- (1) 建立了FBG对温度与应力交叉敏感的电磁波分析模型，探究了引起该现象的物理起因，找出解决FBG温度与应力去交叉敏感的方法；
- (2) 提出了通过检测反射光谱中心波长偏移与透射光谱旁瓣时延

的FBG温度/应变复合传感方案，仿真分析与验证该方案的可行性，优化设计了FBG温度/应变复合传感；

- (3) 研制并建立了FBG刻写工艺平台，深入研究平台各模块与设备的特性及其对基于相位掩模法的FBG刻写质量的影响，找到FBG快速、批量制备方法，总结得出工艺规范；
- (4) 设计了单根光纤温度/压力传感器结构，实验探究了该传感器温度、应变敏感特性，获得普通封装后的传感器实物；
- (5) 针对不同的应用场合，攻克了工程应用时该类传感器封装难关，成功用于光传感/通信一体化有源光电传输系统及复合光电缆、FBG级联二维分级光正交编码器、行波管管内温度以及核心部件夹持特性检测。

3.3 取得的突破性进展及创新点

本项目取得的突破性进展与主要创新点如下：

- (1) 首先从耦合模理论出发，分析了FBG传感机理，建立了理论与数值分析模型。采用Matlab编制了单模均匀FBG仿真程序，通过控制变量法研究了周期、长度、有效折射率变化量等对FBG反射谱、透射谱、时延谱及带宽的影响，重点研究了FBG主瓣带宽和旁瓣零点带宽性质及其时延特性。编制了非均匀FBG传输矩阵法仿真程序，分别讨论了啁啾、砌趾光纤光栅的性能。在此基础上，分别研究了FBG温度、应变传感机理，建立了FBG温度/应变传感求解模型，找到了FBG温度/应变交叉敏感起因与解决方法。
- (2) 提出了一种基于FBG反射谱的中心波长漂移与主旁瓣边缘时延变化的温度/应变复合传感方案，建立了相应的分析模型，编制了Matlab仿真程序，仿真验证了该温度/应变复合传感方案的

可行性。基于Matlab编制的程序，优化设计了温度/应变复合传感方案，研究了FBG参数对传感灵敏度的影响，探究得出FBG的最大时延的温度、应变的灵敏系数与FBG长度 L 、有效折射率变化量 $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 的关系。

- (3) 研制了光纤光栅相位掩模法写入平台，详细介绍了248 nm KrF准分子激光器的工作原理和主要性能参数和光纤光栅刻写光路的各个组成部分及相应的工作原理；研究了光纤光栅的制作工艺，实验制备了均匀、啁啾、砌趾光纤光栅。实验研究了FBG制作过程中脉冲能量、脉冲频率、预置应变对所制FBG光谱的影响，以及退火处理和温度/应变对FBG光谱的影响。
- (4) 将该传感器成功用于江苏俊知光电通信有限公司承担的“光传感/通信一体化有源光电传输系统的研发及产业化”省科技成果转化资金项目中。本项目通过对传感、馈电、通信一体化有源光电传输技术的关键共性问题的综合分析研究，以温度/应力光纤光栅传感器作为检测前端，传感器将反应铁塔结构形变程度，及所处的环境温度等物理量转换为一定波长的光信号，通过有源光缆传输给地面的区域监控中心。所研制的光纤光栅传感系统、光电复合缆技术指标达到原项目合同要求。
- (5) 通过本项目已实现的FBG制备平台，研制出FBG型二维光正交码分路级联光编码器，建立了该编码器测试系统，定义了其性能参数，给出测试方案。第三方检测结果表明，该编码器全部功能与指标符合合同要求，功率代价低，支持多用户，可区分等距用户故障。研制了基于FBG级联编码器的PON链路监测实验系统，完成了对远端编码型PON链路监测技术的实验验证，实现了在远端节点处光编码和光分路的同步进行。

(6) 通过本项目已实现的FBG制备平台,研制了特种FBG温度传感器,首次实现了核心真空电子器件一行波管管内温度测试与螺旋线夹持特性测试,为军事装备可靠性提供了可行的技术手段。

四、合同任务指标完成情况

本项目自2015年4月开始启动,至2017年12月完成项目方案提出、理论建模、平台搭建、实验制作、测试等工作。达到了项目合同约定的技术指标。至此,完成合同规定的所有研究内容、目标、技术与成果要求。

在研制过程中我们提出了多项创新思想和技术,建立了单根光纤光栅温度与应力复合传感理论分析模型,分析了温度与应力交叉敏感性的起因,找出实现单根光纤光栅温度与应力复合传感的方法,优化设计出光纤温度、应力复合传感系统。解决了5个关键技术难题,研制了特种FBG刻写工艺平台,给出了光栅刻写的工艺流程与工艺参数。面向江苏俊知光电通信有限公司承担的省成果转化资金项目需求,实现了单根光纤温度与应力复合传感的理论模型与样品制备,分析了光纤光栅的温度与应力交叉敏感性能,实现了单根光纤温度与应力复合传感系统,温度探测精度优于正负1度,应变探测精度优于 $1\mu\epsilon$,波长检测精度达到了8pm,探测长度达到了500m。

此外,面向光纤到户、核心电子器件可靠性的应用需求,成功研制出FBG级联二维分级光正交编码器、基于高温FBG的行波管管内温度监测系统、行波管螺旋线夹持特性级联FBG检测系统。

本项目授权发明专利3件,申请发明专利5件,发表论文5篇,自主搭建新装置1套、新测试装置3套。本研究与江苏俊知光电通信有限公司的研究目标紧密联系,促进了企业技术转型以及高技术产品的更新换代。

五、项目绩效分析

本项目配合江苏俊知光电通信有限公司承担的江苏省科技成果转化资金项目“光传感/通信一体化有源光电传输系统的研发及产业化”展开。该项目的目标产品由传统的信息、能源传输媒介转化为一种集信息/能源传输和环境感知为一体的新型传输系统，增加了对通信系统自身状态监控，提高了其可靠性。通过将传感网络与移动通信网络的广域覆盖传输以及运营管理能力相结合，既能够远距离对移动通信网络进行测控、维护、管理和运营，又可以通过灵活价廉的终端设备通信手段。项目的实施有效地加速了第四代移动通信网络的建设进程，促进了物联网、通信网系统的融合，带动就业。

同时在项目实施过程中，东南大学国家光传感/通信综合网络技术国家地方联合工程研究中心与江苏俊知光电通信有限公司的两个省级技术中心和认定企业技术中心通力合作，合力打造产品技术研发及产业化平台，形成了采用自身研发与外引内联相结合的新的新项目研发方式，组成了新产品开发效率高、成果推广应用快、信息反馈及时的合作研发创新团队。进一步推动公司的技术革新，加快培养公司发展需要的高层次人才，加快本项目在市场的快速转化，提高企业的核心竞争力，并进一步夯实了该公司在行业的领先地位。

六、存在问题、有关建议及下一步研究设想

本项目完成了合同规定的各项研究内容，建立了 FBG 温度/应变复合传感理论模型，研制了仿真软件，开展了 FBG 交叉敏感起因、去敏感方法等研究，提出了可行的技术方案，建立了 FBG 刻写工艺平台，

研制出符合要求 FBG 传感器。面向三个领域的工程应用，研制出光传感/通信复合光电缆与系统、FBG 二维光正交编码器、行波管管内温度 FBG 检测系统、螺旋线夹持特性级联 FBG 检测系统。

接下来，我们将从提高 FBG 刻写速度与成品率的角度出发，固化其工艺加工参数，保证级联光纤光栅编码器制备的可靠性、稳定性。进一步探究实现高性价比、简单易制备 FBG 温度/应变符合传感器的途径；进一步研究该类传感器面向不同应用场景的封装技术；进一步探究该类传感器批量工程应用的渠道。

我们将紧密开展产学研合作，双方共同攻克多分支、大用户数、长距离、低成本光链路检测技术难关，实施技术成果转化与孵化，依据企业参与制定的光分配网络国家标准，研制光链路管理系统的关键器件、模块与设备。