附件

|  |
| --- |
| 1. **項目名稱**   光子晶体光纤传感机理与方法研究 |

|  |
| --- |
| 1. **提名者及提名意見** |
| **提名者 :** 香港特別行政區政府教育局 |
|  |
| **提名意見 :**  项目组是国内外最早将光子晶体光纤（简称PCF）用于气体传感的团队。针对PCF特有的多孔微纳结构，研究了微孔中光与物质（气体）相互作用的机理，PCF与全固态光纤之间熔接及微孔选择性填充的方法，传输光场、微纳结构及外部物理量相互作用的机制等。原创性成果包括：（1）在国际上首次发现了PCF中由于气体吸收引起的巨大光热相位调制效应，阐明了其增强的物理机理，建立了相位调制与泵浦激光、光纤和气体参数之间的定量理论关系，实现了基于此效应的超灵敏、超大动态范围的气体检测，开启了一个崭新的光谱学测量领域，为光微流分析、微纳结构中光与物质的相互耦合作用等领域的前沿科学研究和航天密封舱内空气质量监测、工业污染和故障气体检测等领域的国民经济重大需求，提供了理论基础和技术支持; 揭示了狭长微孔对气体扩散速度的影响规律，提出了在PCF上引入侧向进、出气微通道来提高响应速度的方法；研究掌握了飞秒激光和PCF微结构相互作用的机理，在PCF上制备了世界上损耗最小的微通道阵列，解决了PCF气体传感器响应速度慢的难题。（2）提出通过改变局部微纳结构来调控PCF模场的方法，阐明了调控的物理机制，并基于此实现了多种PCF与全固光纤的低损耗熔接；提出了一种基于微孔塌陷效应的PCF微孔选择性填充的方法，为基于PCF的光微流器件奠定了基础。（3) 揭示了PCF轴向微纳结构形变导致的光纤模式之间的强耦合效应，基于此效应制备了“结构型”PCF长周期光栅，实现了温度交叉敏感度低的高灵敏应变传感器。  研究成果获得国内外同行广泛采用和高度评价，在光传感领域有重要影响。  提名该项目为国家自然科学奖 2 等奖。 |
| 1. **項目簡介** |

本项目属于**波导光学与集成光学技术**学科。光纤传感器可远程测量、抗电磁干扰、能在易燃易爆等恶劣环境下工作，这些都是其他传感器无法比拟的。然而，传统的光纤传感器基于全固态的掺杂石英材料，通过“材料”的敏感特性实现传感，在测量精度、传感功能和温度稳定性等方面有局限性。本项目研究基于光子晶体光纤（Photonic Crystal Fiber，简称PCF）传感的机理和方法。PCF是一种新型的多孔微纳结构光纤，由单一石英材料构成，其特有的微纳“结构”敏感特性可以从根本上提高探测灵敏度和温度稳定性并实现新的传感功能，是本领域的研究前沿。但微纳结构中光与物质、微结构与传输光及外部参量相互作用的物理机制和基础理论的研究严重不足。本项目针对这些问题，在三个核心方面开展了研究：微孔中光与物质（气体）的作用机理，传感PCF与传输光纤之间的熔接及微孔的选择性填充方法，传输光场、微纳结构及外部参量的相互作用机理。在此基础上，演示了性能优异的气体传感系统和应变传感器件。主要科学发现如下：

**发现点一**：首次发现并阐明了空芯PCF中巨大的光热相位调制增强效应。建立了相位调制与泵浦激光、光纤和气体参数之间的理论关系，实现了测量下限为1 ppb量级、动态范围为6个数量级的新型全光纤气体（乙炔）传感系统，其性能比之前的光纤传感器提高了3个量级，可比肩甚至超过复杂的空间光学测量系统，成果发表于《Nature Communications》上。作为上述突破的重要支撑，项目组首次实验演示了基于直接吸收的PCF传感器，率先提出、分析并验证了引入侧向进、出气微通道来提高响应速度的方法，完善了低损耗微通道阵列的制备技术，解决了PCF传感器响应速度慢的难题。

**发现点二：**阐释了PCF微纳结构的形变对其模场调控的原理，并在此基础上实现了多种PCF与全固体光纤的低损耗熔接耦合，促进了PCF器件和常规光纤系统的集成；提出并演示了一种基于微孔局部塌陷来实现微孔选择性填充的方法，为PCF微流器件的发展奠定了基础。

**发现点三：**揭示了PCF轴向微纳结构周期性变化导致的光纤模式之间的谐振耦合效应。在世界上率先于空芯PCF上制作了“结构型”长周期光栅，实现了弯曲不敏感、温度交叉敏感度低的应变传感器。在实芯PCF上制作了“结构型”长周期光栅，阐明了局部应力集中导致的应变增敏机理，实现了应变灵敏度比常规“折射率型”光栅高25倍，同时温度交叉敏感度低的传感器。

PCF发明人、英国皇家科学院院士Russell教授，斯坦福大学Digonnet和 Fan教授等多个团队对本项目的工作给予高度评价并在其研究工作中采用了本项目提出的原理或方法。部分成果被《Nature Photonics》等作为亮点研究进行了报道。项目发表SCI论文50余篇，授权发明专利5项（中国2项，美国3项）。研究成果获得顶尖国际光纤传感大会最佳学生论文奖及亚太光学传感会议最佳学生论文奖。本项目部分工作的结题答辩被国家自然科学基金委评价为特优。

|  |
| --- |
| 1. **客觀評價**   **发现点一【代表论文1，2, 3，4】**  国际光学工程学会（SPIE）前主席、著名光纤传感专家Culshaw教授在2016年美国召开的SPIE会议作特邀报告"Optical fibre gas detections systems"（引文1）时，将代表论文1作为最新、高灵敏（ppb级）光纤气体传感技术进行了整段介绍。重庆大学朱涛教授等在《IEEE Photonics Journal》发表的论文（引文2）中，对代表论文1进行了大幅正面报道，并采用了代表论文1中创建的公式及一种不同的谐波检测方案验证了代表论文1中报道的高灵敏结果。国家自然科学基金委网站基金要闻里报道了这项“光纤传感领域取得的重要进展”（附件10）。发现点一的实用性也得到了众多应用领域的关注: 深圳市仪器仪表与自动化行业协会在2015年发表的行业报告（附件11）中做了整篇报道，认为：“该方法对于具有光谱吸收的液体和气体检测具有普适性，可广泛应用于医学、化学及生物化学等重要领域的痕量物质检测”。武汉大学唐炬教授等在近期电气绝缘气体SF6分解物探测技术的综述文章（附件12）中介绍了代表论文1的技术，并在段尾表达对这类新技术在电气应用的进一步关注。  光子晶体光纤发明人、英国皇家学院院士（FRS）、美国光学学会（OSA）前主席）、德国马普所的Russell教授等人在《Chem Soc Rev》（影响因子 IF 40.2）的PCF光化学传感综述论文（引文3）中的评价：代表论文2是“早期基于实芯PCF 吸收光谱（包括生物分子、气体和液体）的几个范例”；其中代表论文2是气体传感的代表，“最早利用实芯PCF进行气体探测的实验”，比其他都早。引文3同时认为“PCF气体传感的一个重要挑战是获得足够短的响应时间”，而面对这个挑战，“最近研究（代表论文3）表明可以在PCF包层中制作流体微通道, 使气体从侧面到达光纤空芯中…, 而每通道额外的光传输损耗可降低至0.1dB 以下,传感器的响应时间可短到3秒(代表论文4)”。  光纤传感专家、葡萄牙波尔图大学Santos教授团队发表于《Laser & Photonics Reviews》的PCF传感综述（引文4）：何（约礼）等演示了敏感的乙炔气体探测（代表论文2）,… 提出并模拟了PCF上周期性开口的方法… 最大限度地减小了气体扩散到光纤中的时间”（代表论文3）.  英国皇家工程院院士、英国南安普敦大学光电子研究中心Richardson 教授团队在《Optics Express》发表的PCF微通道制备文章（附件13）对代表论文3的评价，认为“在PCF侧面制作沿光纤长度分布的微通道，使PCF内包层/纤芯微孔与外部环境连通，将显著提高PCF的进气速度”。  英国爱丁堡大学的Jones教授等人发表在《Lab on a Chip》的PCF光微流应用文章（附件14）首页中介绍了两个“最初的光微流系统”工作，其中之一为代表论文2，其发表时间比另一个早五年。  《Nature Photonics》（IF 32.5）在亮点研究栏目中以“Fast Response Fibre”为专题介绍了代表论文4实现的快速响应PCF甲烷传感器（附件15）。  **发现点二【代表论文5，6】**  美国斯坦福大学Digonnet和Fan教授（OSA/SPIE/IEEE/APS Fellow）等人在《Optics letters》发表的文章（引文5）中提到“空芯PCF与普通光纤的低损耗熔接，对于其大多数应用是至关重要的”，这篇文章采用了代表论文5的方法，对空芯PCF与普通光纤连接损耗的进一步优化进行了理论和实验研究。发现点二提供的熔接方法使用普通光纤熔接机即可完成多种PCF与普通光纤的高效耦合，在学术界被广泛使用。代表性的有Russell教授在《Nature Photonics》的文章（附件16）中，采用代表论文5中的方法“将一段高数值孔径光纤作为过渡光纤，与实现PCF和普通单模光纤进行熔接…”；在《Optica》文章（附件17）首页，提到采用代表论文5的方法“降低了连接损耗”，能将细芯PCF“很容易地集成到了传统光纤激光器光路中”。西班牙、墨西哥等多位教授也在他/她们的研究文章中多次提到采用代表论文5的方法将PCF与其它光纤进行连接（附件18）。  Russell教授在引文1中单独介绍了代表论文6中报道的选择性填充方法“使用熔接机即可（在选择性填充时）避免PCF包层微孔被填充”，并提到他们在附件19中在空芯PCF内壁“‘装饰’铑（Rh）纳米颗粒”时采用了代表论文6的方法来“使PCF包层中空气孔塌陷来使填充物只进入PCF中心空气孔”。巴西学者Matos等发表在《Physical Review Letters》文章（引文6）中，使用了代表论文6的方法“使增益介质只进入PCF空芯，同时保留PCF的空气包层结构”。  **发现点三【代表论文7，8】**  马来西亚科学院院士Ahmad教授在其综述论文（引文7）中对代表论文7报道的空芯长周期光纤光栅的传感特性进行了评价，认为“…如此的应变传感器有效地降低了温度和应变之间的交叉敏感问题…”。同时还评价代表论文8是“首次在空芯光子带隙PCF上成功制备的高质量长周期光纤光栅”随后大篇幅地正面评论了代表论文8的工作并引用其实验图片。  代表论文7被《Photonics Spectra》选编为技术新闻，以“Wrinkles Improve Fiber Optic Strain Sensor”转载报道（附件20），并评价这个工作使光栅传感器“在不增加温度敏感性的情况下提高了对应变的敏感性”其中“成功的秘诀是光纤上的周期性皱折”。  意大利Cusano 教授在引文8中多处对代表论文8进行了大幅正面评价：“近十年人们一直试图在空芯PCF中写入光栅，但…非常困难，…因为该光纤95%的光能量在空气芯中传输以致于紫外激光不可能在该光纤中诱导起折射率调制。…王（义平）等2008年利用CO2 激光解决了这个难题”。基于代表论文8中提出的基本原理，Cusano 教授团队之后也在空芯PCF上制备了类似的长周期光栅。 |
| 1. **代表性論文專著目錄**  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | | 序號 | 論文專著  名稱/刊名  /作者 | 年卷頁碼  （xx年xx卷  xx頁） | 發表時間（年月 日） | 通訊作者（含共同） | 第一作者（含共同） | 國內作者 | SCI  他引次數 | 他引總次數 | 論文署名單位是否包含國外單位 | | 1 | Ultra-sensitive all-fibre photothermal spectroscopy with large dynamic range.  *Nature Communications*  Wei Jin, Yingchun Cao, Fan Yang, Hoi Lut Ho | 2015年6卷 6767页 | 2015年4月13日 | 靳伟 | 靳伟  曹迎春  杨帆 | 靳伟，曹迎春，杨帆，何海律 | 28 | 36 | 否 | | 2 | Evanescent-wave gas sensing using microstructure fiber  *Optical Engineering*  Y. L. Hoo, W. Jin, H. L. Ho, D. N. Wang, Robert S. Windeler | 2002年41(1)卷8-9页 | 2002年1月1日 | 何约礼 | 何约礼 | 何约礼，靳伟，何海律，王东宁 | 54 | 113 | 是 | | 3 | Design and modeling of a photonic crystal fiber gas sensor.  *Applied Optics*  Yeuk L. Hoo, Wei Jin, Chunzheng Shi, Hoi L. Ho, Dong N. Wang, Shuang C. Ruan | 2003年42(18)卷 3509-3515页 | 2003年6月20日 | 何约礼 | 何约礼 | 何约礼，靳伟, 施纯铮, 何海律，王东宁，阮双琛 | 103 | 221 | 否 | | 4 | Fast Response Microstructured Optical Fiber Methane Sensor With Multiple Side-Openings.  *IEEE Photonics Technology Letters*  Y. L. Hoo, Shujing Liu, Hoi Lut Ho, Wei Jin | 2010年22(5)卷 296-298页 | 2010年3月1日 | 何约礼 | 何约礼 | 何约礼，刘淑静，何海律，靳伟 | 24 | 48 | 否 | | 5 | Fusion splicing photonic crystal fibers and conventional single-mode fibers: Microhole collapse effect.  *Journal of Lightwave Technology*  Limin Xiao, M. S. Demokan, Wei Jin, Yiping Wang, Chun-Liu Zhao | 2007年25(11)卷 3563-3574页 | 2007年12月6日 | 肖力敏 | 肖力敏 | 肖力敏,靳伟，王义平，赵春柳 | 106 | 187 | 否 | | 6 | Fabrication of selective injection microstructured optical fibers with a conventional fusion splicer.  *Optics Express*  Limin Xiao, Wei Jin, M. S. Demokan, Hoi L. Ho, Yeuk L. Hoo, Chunliu Zhao | 2005年13(22)卷 9014-9022页 | 2005年10月31日 | 肖力敏 | 肖力敏 | 肖力敏，靳伟,何海律，何约礼，赵春柳 | 101 | 160 | 否 | | 7 | Highly sensitive long-period fiber-grating strain sensor with low temperature sensitivity.  *Optics Letters*  Yiping Wang, Limin Xiao, D. N. Wang, Wei Jin | 2006年31(23)卷 3414-3416页 | 2006年12月1日 | 王义平 | 王义平 | 王义平，肖力敏，王东宁，靳伟 | 80 | 129 | 否 | | 8 | Long period gratings in air-core photonic bandgap fibers.  *Optics Express*  Yiping Wang, Wei Jin, Jian Ju, Haifeng Xuan, Hoi Lut Ho, Limin Xiao，Dongning Wang | 2008年16(4)卷 2784-2790页 | 2008年2月13日 | 王义平 | 王义平 | 王义平，靳伟，居剑，宣海峰，何海律，肖力敏，王东宁 | 32 | 70 | 否 | | 合 計 | | | | | | | 528 | 964 |  | | | |
| 1. **主要完成人情況** | | |

|  |
| --- |
| **姓名 :** 靳伟 |
| **排名 :** 1 |
| **行政職務 :** 无 |
| **技術職稱 :** 讲座教授 |
| **工作單位 :** 香港理工大学 |
| **完成單位 :** 香港理工大学 |
| **對本項目主要學術貢獻 :**  靳伟作为项目负责人提出、指导并合作进行了PCF传感机理与方法的研究。同博士生、博士后及同事一起，进行了PCF气体传感器的首次实验,提出和分析了在PCF上引入侧向进气微通道来提高响应速度的方法并完善了飞秒激光进气微通道的方法,发现并阐明了PCF纤芯对光热相位调制的增强效应（发现点一）；提出了通过重复电弧放电进行局部微结构调控来改变PCF模场大小、降低耦合损耗的方法，实现了不同PCF与常规光纤之间的低损耗连接 （发现点二）；揭示了PCF轴向微结构调控来实现光纤模式之间的强耦合的方法，在实芯和空芯PCF上制作了“结构型”长周期光栅，阐明了应变增敏机理，实现了温度交叉敏感度低的应变传感器（发现点三）。 |

|  |
| --- |
| **姓名 :** 肖力敏 |
| **排名 :**  2 |
| **行政職務 :** 无 |
| **技術職稱 :** 研究员 |
| **工作單位 :** 复旦大学 |
| **完成單位 :** 香港理工大学 |
| **對本項目主要學術貢獻 :**  肖力敏对本项目的重要科学发现点二做出了实质性贡献，是代表论文5和6的第一作者，靳伟教授是博士导师。要发挥光子PCF的优势，必须将它低损耗无缝融入传统光纤器件与光网络中，但该光纤精细的微孔和脆弱的孔壁结构使得它与传统光纤熔接时面临很大的挑战，是限制其应用发展的瓶颈问题。系统分析了不同类型PCF在不同条件电弧放电下的微孔塌陷规律，创造性地提出了微电流电弧重复放电的方法来熔接PCF和通信单模光纤，并且首次提出了微结构光纤熔接中的本质问题：微孔塌陷效应，并系统优化和实现了不同类型的微结构光纤低损耗熔接。该工作曾被Web of Science多次列为高引论文，是PCF熔接领域引用次数最高的论文。 |
| **姓名 :** 王义平 |
| **排名 :** 3 |
| **行政職務 :** 特聘教授 |
| **技術職稱 :** 教授 |
| **工作單位 :** 深圳大学 |
| **完成單位 :** 香港理工大学 |
| **對本項目主要學術貢獻 :**  王义平对本项目的重要科学发现点三做出了实质性贡献，是代表论文7和8的第一作者，靳伟教授是其博士后共导师。首次利用CO2激光加热塌陷空气孔的方法在空芯PCF中成功制备世界上第一支长周期光栅，并发现其具有独特的传感特性。利用实芯PCF成功制备了低温度敏感的高灵敏度应变传感器，克服了温度和应用之间的交叉敏感问题。 |

|  |
| --- |
| **姓名 :** 何约礼 |
| **排名 :** 4 |
| **行政職務 :** 經理(科技創業基金) |
| **技術職稱 :** 博士 |
| **工作單位 :** 香港特别行政区政府创新科技署 |
| **完成單位 :** 香港理工大学 |
| **對本項目主要學術貢獻 :**  何约礼对本项目的重要科学发现点一做出了实质性贡献。在靳伟教授的指导下，首次实验展示了实芯PCF和空芯PCF气体传感器,提出沿着PCF建构周期性微通道进行气体快速扩散的概念，对PCF气体检测的时间响应、传感灵敏度和建构微通道对PCF波导特性的影响进行了理论及模拟分析。利用飞秒激光器在空芯PCF上制作了进气低损耗微通道阵列,提高了PCF气体传感器的响应速度，实现了3秒的响应时间。 |

|  |
| --- |
| **姓名 :** 曹迎春 |
| **排名 :** 5 |
| **行政職務 :** 无 |
| **技術職稱 :** 博士后 |
| **工作單位 :** 波士顿大学 |
| **完成單位 :** 香港理工大学 |
| **對本項目主要學術貢獻 :**  曹迎春对本项目的重要科学发现点一做出了实质性贡献。在空芯PCF光热光谱气体检测技术的形成过程中，做了大量的理论和实验研究，包括空芯PCF受内部压强下的光学相位变化、光热光谱技术实验系统的搭建和前期数据的采集和分析、论文的撰写和修改。 |

|  |
| --- |
| 1. **完成人合作關係說明** |

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **序號** | **合作方式** | **合作者** | **合作時間** | **合作成果** | **證明材料** | **備註** |
| 1 | 论文合著 | 曹迎春, 靳伟 | 2009-08-25至  2015-04-03 | 发现点一 | 代表论文1 | 曹迎春(博士生）， 靳伟（导师） |
| 2 | 论文合著 | 何约礼, 靳伟 | 2000-11-01至  2010-10-31 | 发现点一 | 代表论文2,3,4 | 何约礼(博士生及博士后), 靳伟（导师） |
| 3 | 论文合著 | 肖力敏, 王义平, 靳伟 | 2004-11-18至  2008-02-13 | 发现点二、三 | 代表论文5，7, 8 | 肖力敏(博士生），王义平（博士后）， 靳伟（导师） |
| 4 | 论文合著 | 肖力敏, 何约礼，靳伟 | 2004-11-18至  2005-10-31 | 发现点二 | 代表论文6 | 肖力敏(博士生），何约礼(博士生), 靳伟（导师） |