

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.04.10

光子晶体光纤 Fabry-Perot 结构温度传感特性研究

周康鹏^{1,2}, 董明利^{1,2}, 郝群³, 祝连庆^{1,2}

(1. 北京信息科技大学 先进光电子器件与系统创新引智基地, 北京 100192;

2. 北京信息科技大学 光纤传感与系统北京实验室, 北京 100016;

3. 北京理工大学 光电学院精密光电测试仪器及技术北京市重点实验室, 北京 100081)

摘要: 提出了一种将光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)与单模光纤(Single Mode Fiber, SMF)拼接而成的法布里-珀罗干涉(Fabry-Perot Interferometer, FPI)传感器, 形成 SMF-PCF-SMF 结构, 其中 PCF 为 F-P 腔。反射谱波长周期为 2.18 nm, 条纹对比度达到 13.12 dB。研究了 FPI 传感器的温度响应, 在 50~400 °C 分别进行了升温 and 降温实验, 波长灵敏度为 12.3 pm/°C, 线性度大于 0.993。该传感器具有交叉灵敏度低、温度稳定性好、线性度高等优点, 可用于工业生产、航空航天、生物医学等温度传感领域。

关键词: 光子晶体光纤; 单模光纤; 温度传感器; 法布里-珀罗干涉仪

中图分类号: TB9; TN253

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)04-0080-05

Research on Temperature Sensing Characterization of PCF Fabry-Perot Structure

ZHOU Kangpeng^{1,2}, DONG Mingli^{1,2}, HAO Qun³, ZHU Lianqing^{1,2}

(1. Overseas Expertise Introduction Center for Discipline Innovation ("111 Center"),

Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China;

2. Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, China; 3. Beijing Key Laboratory for Precision Optoelectronic Measurement Instrument and Technology, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The paper proposed and studied a Fabry-Perot interferometer (FPI) sensor by splicing a photonic crystal fiber (PCF) to a well-cleaved single-mode fiber (SMF) and preparing a SMF-PCF-SMF structure in which the section of PCF is the cavity. The spectrum wavelength interval is 2.18 nm and its contrast is up to 13.12 dB. The temperature response of the FPI sensor was investigated experimentally in the range of 50 ~ 400 °C with temperature-rise and temperature-drop process. The wavelength sensitivity is 12.3 pm/°C and its linearity is greater than 0.993. The proposed sensor could offer some excellent features such as low cross-sensitivity, good temperature stability and linearity, which makes it attractive in the areas of industrial production, aerospace and biomedicine.

Key words: photonics crystal fiber; single mode fiber; temperature sensor; Fabry-Perot interferometer

0 引言

光纤传感器具有结构紧凑、重量轻、灵敏度高、响应快和抗电磁干扰等优点^[1-3]。法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)传感器作为一种光纤传感器, 广泛应用于医疗、桥梁健康监测、航天、军事等领域, 包括温度、应变、压力、折射率和曲率的测量^[4-9]。其中, 温度作为监测的重要参数已受到越来越广泛的关注。

目前, 为了在光纤中制备 F-P 结构, 相关文献已经报道了一些常用的方法, 如化学刻蚀、电弧放电和飞秒激光刻蚀等^[10-12]。电弧放电是一种具有良好可控性的方法, 可以自由调节放电电流和放电时间, 通过

重复放电实现对传感器参数的控制。与其他光纤传感器相比, 基于光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)和其他类型光纤的电弧放电构成的 F-P 传感器由于具有纯硅结构, 在一定程度上具有更强的抗电磁干扰能力^[13]。国内外已经开展了基于 PCF 的 F-P 传感器的相关研究。2014 年, Zhang 等人^[14]提出了一种基于空芯光子晶体光纤(HCPCF)内部成腔的 F-P 传感器探针, 在 1.333 ~ 1.413 的折射率范围内灵敏度为 -54.409 dB/RIU。2015 年, Ran 等人^[15]报道了用 157 nm 激光在 PCF 端面加工 PCF 成槽, 与 SMF 相对熔接形成 F-P 腔, 压力灵敏度为 -54.7 pm/MPa, 温度灵敏度为 0.45 pm/°C。2016 年, Dash 等人^[16]提出了一

种基于 HCPCF 的双 F-P 腔的制备方法, 进行应变、曲率和温度传感。2017 年, Polyzos 等人^[17]提出了一种由 SMF(SM-28)与 PCF(ESM-12B)拼接构成的本征 F-P 结构, 将其与基于 SM-28 的 F-P 传感器进行比较, 以测试该传感器的温度稳定性。2018 年, Wang 等人^[18]通过熔融放电的方式将 PCF 与 SMF 熔接产生端面 F-P 腔, 进行压力测量。国内外针对 PCF-FP 结构的传感器已经进行了相关研究并取得一定进展, 但上述传感器存在制造工艺复杂、缺少对 PCF 的有效保护以及 PCF 熔接过程中因气体塌陷引起的高损耗等问题, 严重影响参数测量。

综上所述, 本文提出了一种基于 SMF-PCF-SMF 结构的 F-P 温度传感器。对传感器的工作原理和设计结构进行了分析与实验, 实现了周期 2.18 nm、条纹对比度 13.12 dB 的光纤 F-P 腔的制备。实验克服了 PCF 在熔接过程中的塌陷问题, 严格控制了 PCF 的长度。

1 传感器工作原理

传感器原理图如图 1 所示。该传感器通过在 PCF 两端熔接 SMF 制成。当光 I_1 沿单模光纤传输至 SMF 与 PCF 的熔接面 R_1 时, 一部分光 I_2 由于菲涅尔反射效应反射回原 SMF 中, 另一部分光 I_3 透射进入由 PCF 形成的 FP 腔内并传输至另一熔接面 R_2 ; 同样地, 光在 R_2 处也会发生菲涅尔反射和透射, 该反射光 I_4 透过后, R_1 与 I_2 产生光程差, 进而发生 F-P 干涉, PCF 为 F-P 的腔。

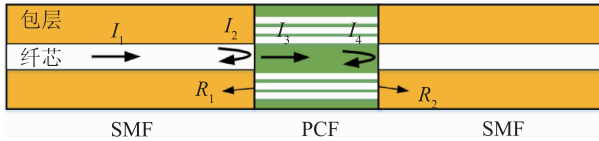


图1 传感器原理图

形成的干涉光谱强度可以表示为^[19]

$$I_{\text{FPI}} = I_2 + I_4 + 2\sqrt{I_2 I_4} \cos\left(\frac{4\pi n L_{\text{FPI}}}{\lambda} + \varphi_0\right) \quad (1)$$

式中: I_{FPI} 为干涉谱光强; L_{FPI} 为腔长; n 为腔体的折射率; λ 为传输光的波长。

FPI 的反射光的光程差 l 可表示为

$$l = 2nL_{\text{FPI}} \quad (2)$$

由式(1)可知, 干涉光谱第 m 级波谷处的波长 λ_{FPI} 满足

$$\frac{4\pi n L_{\text{FPI}}}{\lambda_{m\text{FPI}}} + \varphi_0 = 2m\pi \quad (3)$$

联立式(2)、式(3), 可得

$$l = \left(m - \frac{\varphi_0}{2\pi}\right) \lambda_{m\text{FPI}} \quad (4)$$

由式(4)可知, 光程差与该级次波谷处的波长成正比。

当外界温度发生变化时, 热光效应和热膨胀效应会相应变化, 导致 FPI 的腔长和 PCF 纤芯的有效折射率发生改变, 最终引起光程差的改变, 式(2)可转化为

$$\begin{aligned} \Delta l &= 2\Delta n L_{\text{FPI}} + 2n \Delta L_{\text{FPI}} = 2n\xi \Delta T L_{\text{FPI}} + 2n L_{\text{FPI}} \alpha \Delta T \\ &= 2n L_{\text{FPI}} (\xi + \alpha) \Delta T \end{aligned} \quad (5)$$

式中: ξ 和 α 分别为 PCF 纤芯的热光系数与热膨胀系数。一般地, 光纤纤芯的热膨胀系数与热光系数均视为常数。由式(5)可知 FPI 腔的光程差变化量与温度的变化呈正比。

联立式(4)、式(5), 可得

$$\Delta T = \frac{\Delta l}{l(\xi + \alpha)} = \frac{\Delta \lambda_{m\text{FPI}}}{\lambda_m(\xi + \alpha)} = \frac{\Delta \lambda_{m\text{FPI}}}{(\xi + \alpha)} \cdot \frac{2m\pi - \varphi_0}{4\pi n L_{\text{FPI}}} \quad (6)$$

由式(6)可知, 通过测量干涉光谱的波谷波长漂移量即可实现对温度的测量。

2 传感器制备

该传感器在 WZ-2010 显微镜下的显微影像如图 2 所示。该传感器以 SMF(SMF-28, Corning)为输入端, PCF(SM-10, Perfos)两端分别熔接 SMF 构成 FPI。

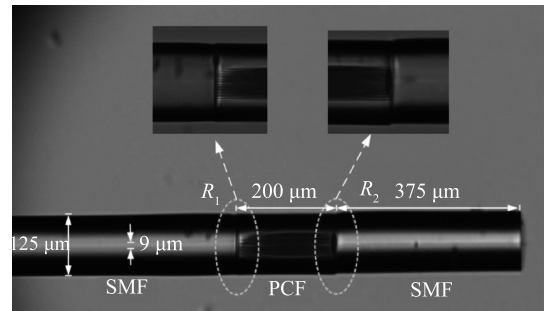


图2 传感器影像图

传感器的制备只需熔接机(80S, Fujikura)和切割刀(CT-30, Fujikura)完成。首先, 分别将 SMF 和 PCF 端面去除涂覆层, 用酒精擦拭干净, 端面经切割刀切平后放入熔接机中。为避免 PCF 在熔接过程中的气体塌陷, 需手动设置熔接机熔接放电参数, 设置光纤预熔功率为“标-100 bit”, 光纤预熔时间为“180 ms”, 重叠为“15 μm”, 放电功率为“标-50bit”, 光纤对准采用“手动”模式。为保证 PCF 长度严格可控, 需先将 PCF 切至 1 cm 后在再放入 CT-30 切割刀中, 所得到的 PCF 长度为 200 μm。其次, 取另一段 SMF 经剥除涂覆层、酒精擦拭与切平等步骤后, 采用相同的熔接工艺将其与

PCF 熔接并切至 $375\ \mu\text{m}$ 。从图 2 中可以看出, 在 SMF 与 PCF 的熔接面处 PCF 无明显的空气孔塌陷且平整。

搭建实验测试系统, 如图 3 所示。该系统包括宽带光源(BBS, $1520\sim 1610\ \text{nm}$)、环行器、光谱分析仪(OSA, AQ 6375, Yokogawa)和传感器单元。传感器连接至环行器的 2 端口, BBS 连接至环行器($1550\ \text{nm}$, Shconnect)的 1 端口为传感器提供光源, 光谱仪连接至环行器端口 3 接收传感器反射光谱。

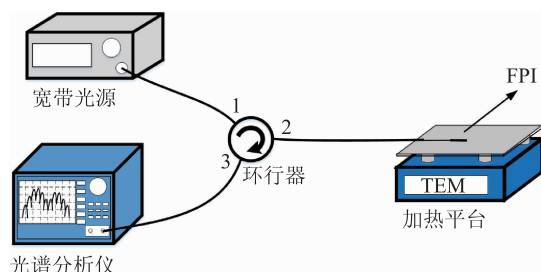


图3 实验测试系统

F-P 反射光谱和光源光谱如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 对比光源光谱, F-P 反射光谱平滑且无明显损耗。选取 $1572\ \text{nm}$ 附近的波谷作为测试点, 测得 F-P 反射谱的周期为 $2.18\ \text{nm}$, 条纹对比度为 $13.12\ \text{dB}$ 。

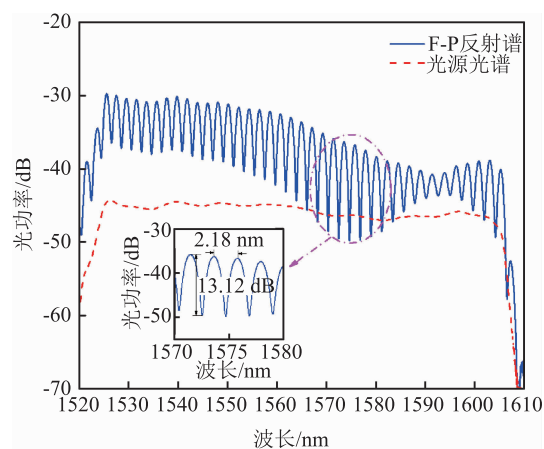
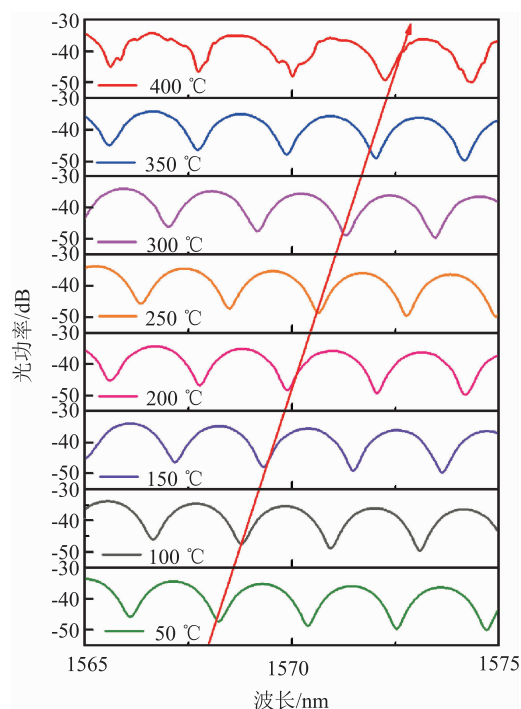


图4 F-P 反射光谱和光源光谱

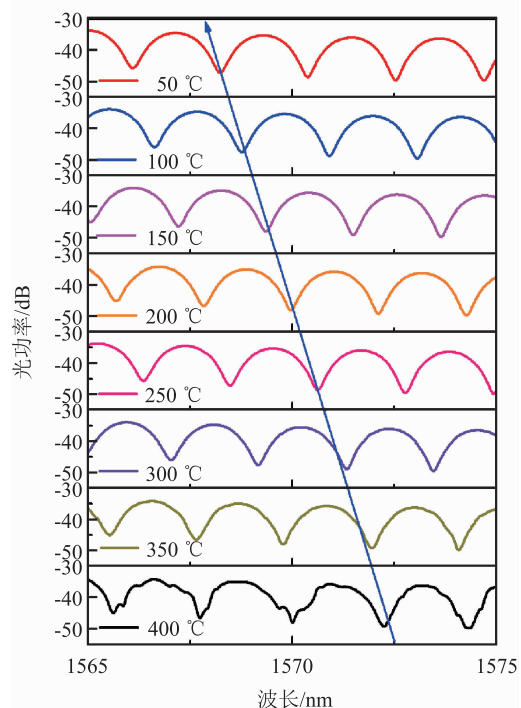
3 实验结果与分析

将传感器固定于加热平台上, 设置温度变化范围为 $50\sim 400\ ^\circ\text{C}$, 温度每上升 $50\ ^\circ\text{C}$ 对反射光谱进行一次采集。为避免空气湿度和气流扰动对测试造成影响, 整个测试过程在恒温恒湿的超净间内完成。升、降温过程光谱漂移曲线如图 5 所示, 由于 $1572\ \text{nm}$ 波长附近的光谱稳定, 对比度较高, 可将此处波作为测试点进行分析。

测试点处的特征光谱曲线如图 5 所示。随着测试温度逐渐增加, F-P 腔的干涉波谷向长波方向移动, $50\ ^\circ\text{C}$ 至 $400\ ^\circ\text{C}$ 的波长红移量为 $4.05\ \text{nm}$; 随着测试温度逐渐降低, F-P 腔的干涉波谷向短波方向移动, $400\ ^\circ\text{C}$ 至 $50\ ^\circ\text{C}$ 的波长蓝移量为 $4.03\ \text{nm}$ 。



(a) 升温过程特征光谱漂移曲线



(b) 降温过程特征光谱漂移曲线

图5 升、降温过程光谱漂移曲线

将波长漂移量进行线性拟合处理,如图6所示,F-P腔的波长温度灵敏度为 $12.2 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$,线性度为 0.992;在温度测试过程中,最高温度时的波长漂移小于 0.25 nm 。

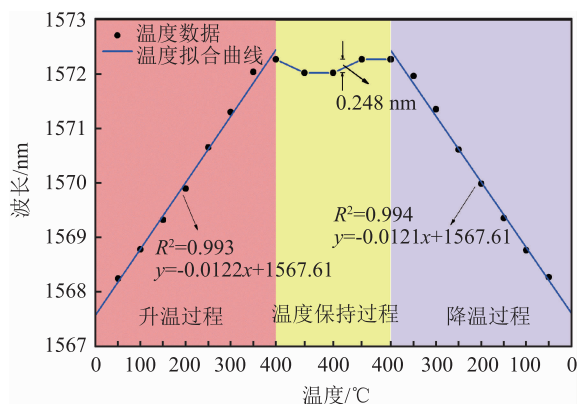


图6 线性拟合曲线

实验对该传感器光谱稳定性进行了测试,当温度达到设定温度时每间隔 5 min 记录一次光谱数据,绘制如图7所示的光功率-时间曲线。从图7中可以看出,光谱光功率在每个采集点的稳定性较高,最大功率漂移量为 0.077 dB ,可排除外界环境对传感器测量结果的影响。

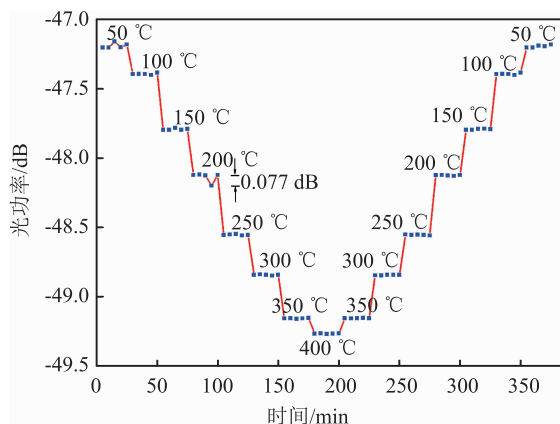


图7 升、降温过程光谱稳定性曲线

4 结论

设计并实现了一种光子晶体光纤 F-P 结构传感器,并对其温度传感特性进行测试与分析。通过将 PCF 与 SMF 进行熔接与切割实现了腔长 $200 \mu\text{m}$ 的 F-P 腔研制。在 $50 \sim 400^{\circ}\text{C}$ 变化范围内,传感器波长随温度升高发生红移现象,随温度降低发生蓝移现象,其温度灵敏度为 $12.2 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$,线性度为 0.993,最高温度的波长漂移量小于 0.25 nm ,最高功率漂移量为 0.077 dB 。因此,

基于 SMF-PCF-SMF 结构的光子晶体光纤 F-P 腔具有灵敏度高、稳定性好、重复性高等优势,在温度传感领域具有一定的应用价值。

参考文献

- [1] 江毅,高红春,贾景善. 光谱域光纤白光干涉测量技术[J]. 计测技术, 2018, 38(3): 31-42.
- [2] Liu Y, Qu S. Optical Fiber Fabry - Perot Interferometer Cavity Fabricated by Femtosecond Laser-induced Water Breakdown for Refractive Index Sensing [J]. Applied Optics, 2014, 53(3): 469-474.
- [3] 张雯,刘小龙,何巍,等. 基于双光栅级联结构的温度及浓度传感特性测试[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(9): 225-231.
- [4] Wu C, Liu Z, Zhang A P, et al. In-line Open-cavity Fabry - Perot Interferometer Formed by C-shaped Fiber for Temperature-insensitive Refractive Index Sensing[J]. Optics Express, 2014, 22(18): 21757-21766.
- [5] 刘铁根,王双,江俊峰,等. 航空航天光纤传感技术研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2014(8): 1681-1692.
- [6] Liu S, Yang K, Wang Y, et al. High-sensitivity Strain Sensor Based on In-fiber Rectangular Air Bubble [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 7624.
- [7] Fu G, Li Y, Li Q, et al. Temperature Insensitive Vector Bending Sensor Based on Asymmetrical Cascading SMF-PCF-SMF Structure [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(3): 7103114.
- [8] He W, Fang Y T, Zhu L Q, et al. Optical Fiber Interference Sensor Based on Fiber Ending Micro-groove Fabricated by Femtosecond Laser [J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2018, 158: 1295-1301.
- [9] Costa G K, Gouvêa P M, Soares L M, et al. In-fiber Fabry-Perot Interferometer for Strain and Magnetic Field Sensing[J]. Optics Express, 2016, 24(13): 14690-14696.
- [10] Shangguan C, Zhang W, Hei W, et al. Fabry-Perot Cavity Cascaded Sagnac Loops for Temperature and Strain Measurements[J]. Optical Engineering, 2018, 57(4): 1.
- [11] 李自亮,廖常锐,刘申,等. 光纤法布里-珀罗干涉温度压力传感技术研究进展[J]. 物理学报, 2017, 66(7): 87-103.
- [12] 顾理,孙会来,于楷,等. 飞秒激光微加工的研究进展[J]. 激光与红外, 2013, 43(1): 14-18.
- [13] Wu D, Zhao Y, Li J. PCF Taper-based Mach - Zehnder Interferometer for Refractive Index Sensing in a PDMS Detection Cell[J]. Sensors and Actuators B Chemical, 2015, 213: 1-4.
- [14] Zhang G L, Yang M H, Dai Y T. Fabry-Perot Fiber Tip Sensor Based on an Inner Air-cavity for Refractive Index Sensing [J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(1): 77-79.
- [15] Ran Z, Liu S, Liu Q, et al. Novel High-Temperature Fiber-

Optic Pressure Sensor Based on Etched PCF F-P Interferometer Micromachined by a 157 - nm Laser[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(7): 3955 - 3958.

- [16] Dash J N, Jha R. Fabry - Perot Cavity on Demand for Hysteresis Free Interferometric Sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(13): 3188 - 3193.
- [17] Polyzos D, Jinesh M, Maier R R J. Long-term Stability Testing of Optical Fibre Fabry-Perot Temperature Sensors [C]// Proceedings of SPIE Fiber Optic Sensors and Applications. Baltimore, 2016: 985218.
- [18] Wang T, Ge Y, Ni H, et al. Miniature Fiber Pressure Sensor Based on an In - fiber Confocal Cavity [J]. Optik, 2018, 171: 869 - 875.
- [19] Wen X, Ning T, Bai Y, et al. Ultrasensitive Temperature Fiber Sensor Based on Fabry-Pérot Interferometer Assisted with Iron V-groove [J]. Optics Express, 2015, 23(9): 11526 - 11536.

基金项目: 高等学校学科创新引智计划资助(D17021); 教育部长江学者与创新团队发展计划项目(IRT_16R07); 国家自然科学基金(61801030)

作者简介



周康鹏(1991 -), 男, 硕士研究生, 研究领域为飞秒激光微纳结构加工及光纤传感。

2015 年于北京化工大学获学士学位, 现就读于北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院。已发表学术论文 5 篇, 其中 SCI 和 EI 3 篇, 申请国家发明专利 3 项。



董明利(1965 -), 女, 满族人, 教授, 博士, 研究领域包括光电与视觉检测、光纤传感与光电器件、生物医学检测技术及仪器。

北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院院长, 中国计量测试学会理事, 中国仪器仪表学会机械量测试仪器分会常务理事, 中国仪器仪表学会测量与控制专业委员会常务理事, 中国仪器仪表学会实验仪器分会常务理事, 北京市专业标准化技术委员会委员, 全国误差与不确定度研究会理事。

2008 年任北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院教授, 并于 2009 年于北京理工大学获博士学位, 2015 年至今任北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院院长。主持承担了国家自然科学基金、国家重点研发计划重大科学仪器设备开发重点专项课题、总装基金等科研项目。发表论文 40 余篇, 申请发明专利 30 余项。2008 年获北京市科学技术二等奖 1 项(第二完成人), 2009 年获国家科技进步二等奖 1 项(第二完成人), 同

年入选“北京市优秀教学团队”(主持), 2011 年入选“北京市学术创新团队”(主持), 2012 年获北京市三八红旗标兵, 同年入选国务院政府特殊津贴专家。



郝群(1968 -), 女, 教授, 博士, 研究领域包括智能光电感测技术、精密光学测量及仪器。

北京理工大学光电学院院长; 中国光学学会常务理事、光电专委会主任委员, 中国仪器仪表学会理事、光机电技术与系统集成分会常务副理事长, 中国兵工学会光学专业委员会主任委员; 《Defence Technology》杂志副主编。

1998 年毕业于清华大学精密仪器系, 同年到北京理工大学工作至今, 其中 1999 ~ 2001 年兼任日本东京大学客座研究员, 2011 年兼任美国凯斯西储大学讲座教授。主持承担了国家自然科学基金重点/仪器专项、国防重大重点等二十余项科研项目; 111 学科创新引智基地负责人。获得省部级科技奖 3 项、国家级教学成果奖 1 项、省部级教学成果奖 4 项。先后入选教育部跨世纪优秀人才培养计划, 全国巾帼建功标兵、北京市教学名师等。授权发明专利 50 项, 发表学术论文 200 余篇。



祝连庆(1963 -), 男, 教授, 博士, 研究领域包括生物医学检测技术及仪器、光纤传感与系统、光电精密测量技术与装置。

中国计量测试学会常务理事、中国仪器仪表学会常务理事、中国光学工程学会理事、中国微米纳米技术学会理事、中国仪器仪表学会测量与控制专业委员会主任委员、中国计量测试学会技术推广与转化工作委员会主任委员, 中国仪器仪表学会机械量测试仪器分会副理事长、中关村光电产业协会副理事长。

1984 年、1989 年于合肥工业大学分别获学士、硕士学位, 2013 年于哈尔滨工业大学获博士学位。主持国家 863 重大课题、教育部长江学者与创新团队发展计划项目、国家重大科技研发专项、国家重大科学仪器设备研制专项、国家自然科学基金、总装备部预先研究项目等国家级、省部级项目 20 余项; 光电测试技术及仪器教育部重点实验室主任, 教育部先进光电子器件与系统学科创新引智基地负责人(国家 111 基地), 光纤传感与系统北京实验室主任。获国家科技进步二等奖 1 项(第一完成人), 获北京市科学技术二等奖 1 项(第一完成人)。先后成为北京学者, 国家级百千万人才, 享受国务院政府特殊津贴专家, 国家有突出贡献中青年专家, 科技北京百名领军人才, 北京市有突出贡献科学人才, 教育部长江学者创新团队带头人, 第七届全国优秀科技工作者, 第十二届、第十三届全国政协委员。多次担任大会共主席、秘书长、组织委员会共主席、程序委员会共主席等重要职务。近年来发表学术论文 110 余篇, 其中 SCI, EI 收录 60 余篇, 出版专著 2 部, 申请国家发明专利 96 项。