材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.06.016

光纤研磨纸粒度对侧边研磨塑料光纤传感器灵敏度的影响

冯利民[1,2]，巫涛江[2,3]，赵　杰[3]，吴德操[2*]

（1. 武汉纺织大学 数学与计算机学院，武汉 430200；2. 重庆理工大学 智能光纤感知技术重庆市高校工程研究中心，重庆市光纤传感与光电检测重点实验室，重庆 400054；3. 电梯智能运维重庆市高校工程中心，重庆 402260）

摘　要： 为了提高侧边研磨型(D 形)塑料光纤倏逝波传感器的灵敏度，采用不同粒度的光纤研磨纸对塑料裸光纤进行侧边研磨，制备了不同直径及不同表面粗糙度的 D 形塑料光纤倏逝波传感器。实验观测了 D 区表面形貌、D 区直径与表面粗粗度对传感器光传输性能及灵敏度的影响。实验研究发现：D 形敏感区域直径及表面粗糙度对传感器光传输及灵敏度影响显著；传感器灵敏度随着 D 区直径的减小先增大后减小，当 D 区直径为 1 200 μm 时，传感器对葡萄糖溶液的响应灵敏度达到最大值：－0.003 2 $(mg/L)^{-1}$；当采用粒度为 9 μm 的光纤研磨纸对光纤进行研磨时，传感器的灵敏度将进一步提升至－0.004 5 $(mg/L)^{-1}$，是未经研磨塑料光纤传感器灵敏度的 11.25 倍。

关键词： 塑料光纤；倏逝波；传感器；表面粗糙度；光传输；灵敏度

中图分类号： TP212　**文章编号：** 1001－5868(2020)06－0845－05

Influence of The Particle Size of Optical Fiber Grinding Paper on The Sensitivity of Edge-lapping Plastic Optical Fiber Sensor

FENG Limin[1,2], WU Taojiang[2,3], ZHAO Jie[3], WU Dechao[2]

(1. School of Mathematics and Computer, Wuhan Textile University, Wuhan 430200, CHN; 2. Chongqing Key Laboratory of Fiber Optic Sensor and Photodetector, Intelligent Fiber Sensing Technology of Chongqing Municipal Engineering Research Center of Institution of Higher Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, CHN; 3. Tielian Operation and Maintenance of Chongqing Municipal Engineering Research Center of Institution of Higher Education, Chongqing 402260, CHN)

Abstract: In order to improve the sensitivity of the edge-lapping (D-shaped) plastic optical fiber (POF) evanescent wave sensor, the optical fiber grinding paper with different particle diameters was used to grind the uncoated POFs to prepare D-shaped POF evanescent wave sensors with different diameters and different surface roughness. The surface morphology of the D-shaped region was checked, and the effects of the diameter and surface roughness of the D-shaped region on the light transmission and sensitivity of the sensors were investigated experimentally. Experimental results indicate that the diameter and surface roughness of the D-shaped sensitive region have a significant effect on the light transmission and sensitivity of the sensor. The sensitivity increases first and then decreases as the diameter of the D-shaped region decreases, and when the diameter is 1200 μm, the sensor's response sensitivity to glucose solution reaches a maximum of －0.003 2 $(mg/L)^{-1}$; when the D-shaped region is polished with the fiber optic paper with the particle size of 9 μm, the sensor's sensitivity will be further improved to －0.004 5 $(mg/L)^{-1}$, which is 11.25 times of that of POF sensor without grinding.

收稿日期：2020－07－28.

基金项目：国家自然科学基金项目(51876018)；重庆市教委项目(KJQN201905604)；重庆市科技局技术创新与应用发展重点项目(cstc2019jscx-mbdxX0002).

* **通信作者：**吴德操　**E-mail：**wudecao@163.com

Key words: plastic optical fiber; evanescent wave; sensor; surface roughness; light transmission; sensitivity

0 引言

塑料光纤相比于石英光纤具有成本低、数值孔径大、光收集能力强、弯曲半径小、柔韧性好等优点，已被广泛应用于短距离光纤通信及光纤传感领域[1-3]。在光纤传感领域，塑料光纤因具有良好的生物兼容性、耐腐蚀、抗电磁干扰、易操作等优点，已被应用于化学、生物化学、生命科学和环境等研究方向[4]。尽管塑料光纤倏逝波传感器具有上述诸多优点，但其灵敏度低[5]。

为了提高塑料光纤倏逝波传感器的灵敏度，研究者们提出了侧边研磨型(D形)、U形、S形、螺旋形、锥形、双锥形等光纤倏逝波传感器[6-8]。在这些不同结构类型的光纤倏逝波传感器中，D形传感器制备工艺简单、制备重复性高，而且采用D形传感器可进一步制成U形、S形及螺旋形光纤倏逝波传感器。因此，D形光纤倏逝波传感器成为研究者及仪器厂商最为关注的一种传感器件[5,9]。

为了提高D形光纤倏逝波传感器的灵敏度，研究者们研究了D形区域直径对传感器光传输性能及灵敏度的影响[5]。武睿等[10]研究表明，光纤经过热融、打点、切割、喷砂、研磨或激光等处理后，光纤表面会发生破损，导致侧面发光增强，从而影响光纤的光传输性能。Zhong等[11-12]采用氢氟酸对石英光纤进行腐蚀，发现光纤表面粗糙度会对传感器光传输性能及灵敏度产生影响，适宜的表面粗糙度将增大传感器的灵敏度。虽然采用湿腐蚀方法能制备出不同直径的圆柱形或锥形石英或塑料光纤，但是腐蚀法难以制备出D形光纤。

为了提高D形塑料光纤倏逝波传感器的灵敏度，本文采用不同粒度的光纤研磨纸对塑料裸光纤进行了侧边研磨，制备了不同直径及不同表面粗糙度的D形塑料光纤倏逝波传感器。实验研究了D区直径对传感器光传输及性能灵敏度的影响，以及采用不同光纤研磨纸研磨后的D形光纤的光传输特性及其对葡萄糖溶液的响应特性。

1 实验材料与系统

1.1 实验材料

塑料光纤由直径为2 000 μm的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)芯层和直径为50 μm的氟塑料包层构成，纤芯折射率为1.49，光纤工作温度为－40～70 ℃。为了研究光纤研磨纸粒度对D形塑料光纤传感器灵敏度的影响，实验选取长度为0.5 m的塑料光纤，将其中间长度为3 cm的光纤保护层剥离，然后利用光纤研磨仪和不同粒度的光纤研磨纸(金刚石磨料)对塑料裸光纤进行侧边研磨，制备了不同D区直径(2000－d，其中 d 为研磨深度)及不同表面粗糙度的D形塑料光纤倏逝波传感器。D形光纤结构示意图如图1所示。

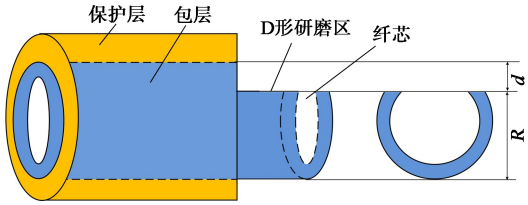


图1 D形塑料光纤结构示意图

1.2 实验系统

传感器实验系统如图2所示，该系统由宽带光源、光纤耦合器、D形塑料光纤传感器、光功率计、光纤光谱仪、样品池等组成。光源为海洋光学DH-2000型氘-卤钨灯(氘灯25 W，卤钨灯20 W)宽带光源，光谱范围为215～2 500 nm。光功率计的光谱探测范围为200～1 100 nm，探测功率范围为100 pW～0.2 W，准确度为1%～4%。QE65 Pro光谱仪探测光谱范围为200～1 100 nm。实验过程中，为了表征D形光纤倏逝波传感器的灵敏度，采用葡萄糖溶液作为分析液，葡萄糖溶液浓度范围为0～12.5 g/100 mL。本文中传感器灵敏度采用传感器输出光强的相对变化量表示：$S=(I_c-I_0)/I_0$，其中 I_c 和 I_0 分别表示传感器在浓度为 c(g/100 mL)的葡萄糖溶液和蒸馏水中的输出光强。

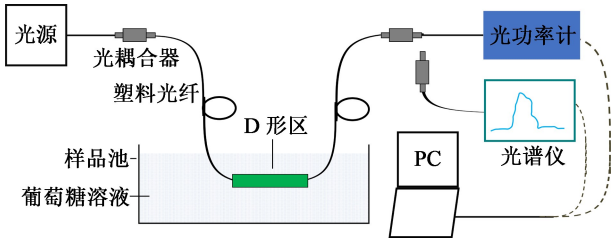


图2 传感器测量系统结构示意图

2　实验结果与讨论

2.1　D 区直径对传感器光传输及灵敏度的影响

为了获得高灵敏度的塑料光纤倏逝波 D 形传感器，首先采用粒度为 0.5 μm 的光纤研磨纸对光纤进行了研磨，研磨后光纤传感区域（D 形区域）的直径为 2 000～600 μm，即研磨深度 d 为 0～1 400 μm。研磨后的 D 形光纤在空气中的传输光谱信息如图 3 所示。

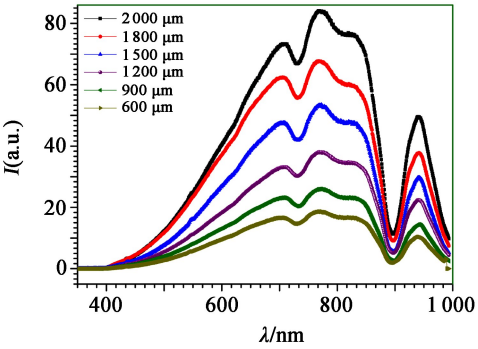


图 3　D 区直径对传感器光传输性能的影响

从图 3 中可以看出，随着光纤研磨深度的增加，光纤传输光谱的质量降低。其原因在于，首先，当光纤被研磨为 D 形后，部分光直接从未经研磨和经过研磨后 D 形光纤的分界面直接透射进入外界环境；其次，在 D 形区域，研磨后的光纤表面具有一定粗糙度，从而增加了光束在光纤与外界环境界面的散射损耗，降低了光纤传输光谱的质量。

为了研究光纤研磨深度对传感器灵敏度的影响，实验测试了采用粒度为 0.5 μm 的光纤研磨纸制备的 D 形传感器对葡萄糖溶液的响应特性，其实验结果如图 4 所示。

从图 4 中可以看出，传感器灵敏度 S 随着光纤研磨深度的增加呈先增大后减小的趋势，当 D 形区域直径为 1 200 μm（研磨深度 d 为 800 μm）时，传感器的灵敏度最佳。因为光纤表面辐射光强随着光纤研磨的深度增加而增大（透射光能量降低，如图 3 所示），光纤表面光强越强，其与分析物作用强度越大，当葡萄糖溶液浓度增加时，光衰减量越大，传感器灵敏度得到提升。当 D 形区域直径小于 1 200 μm 时，进一步减小 D 形区域的直径，传感器灵敏度降低，这是因为光纤内部传输的有效光强减弱，导致光纤表面有效的倏逝波强度减弱[11-12]。当 D 区直径为 1 200 μm 时，传感器灵敏度 S 与葡萄糖浓度 c 之间的函数关系为：$S = -0.003\,2c - 0.002\,7$（$R^2 = 0.989\,7$），计算得传感器对葡萄糖溶液的灵敏度达到 $-0.003\,2\ (\mathrm{mg/L})^{-1}$，是未经研磨塑料光纤的 8 倍。

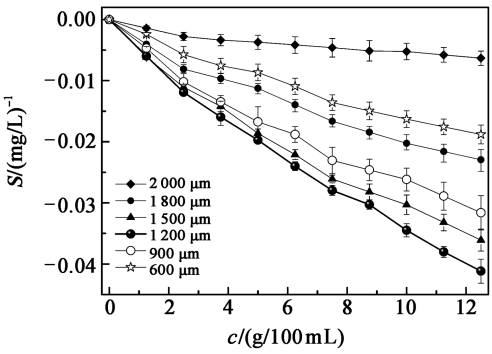


图 4　D 区直径对传感器灵敏度的影响

2.2　光纤研磨纸粒度对传感器表面形貌、光传输性能及灵敏度的影响

文献[11-12]研究指出，光纤倏逝波传感器的灵敏度受到光纤表面粗糙度的影响，为了研究 D 形区域光纤表面粗糙度对传感器灵敏度的影响，采用扫描电镜（SEM）对不同粒度光纤研磨纸研磨塑料后的光纤表面形貌进行了分析，实验结果如图 5 所示。

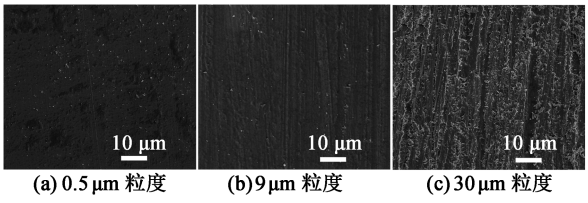


图 5　采用不同粒度光纤研磨纸研磨后的 D 形光纤表面形貌

从图 5 中可以看出，采用不同粒度光纤研磨纸研磨后的光纤表面具有不同的粗糙度，光纤研磨纸粒度越大，光纤表面粗糙度越大。采用不同粒度光纤研磨纸研磨后的光纤（经研磨后光纤的直径为 1 200 μm）在空气中的传输光谱如图 6 所示。

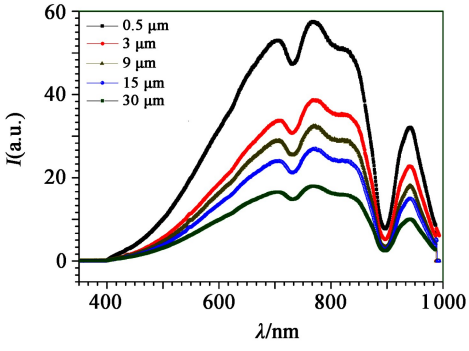


图 6　光纤研磨纸粒度对传感器光传输性能的影响

从图 6 中可以看出，在相同直径下，光纤研磨纸粒度越大，光纤传输光谱质量越低。其原因在于光纤研磨纸粒度越大，研磨后的光纤表面粗糙度越大（如图 5 所示），导致光束在光纤与外界环境界面的散射和折射越强，光衰减越强，传输光谱质量降低[5]。

此外，为了进一步提升 D 形塑料光纤倏逝波传感器的灵敏度（D 区直径为 1 200 μm），实验研究了光纤研磨纸粒度对侧边研磨塑料光纤传感器灵敏度的影响，如图 7 所示。

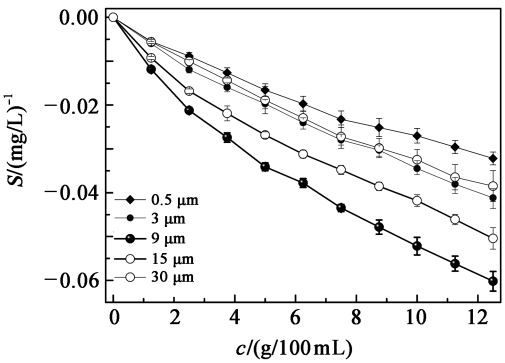


图 7 光纤研磨纸粒度对传感器灵敏度的影响

从图 7 中可以看出，传感器灵敏度随着光纤研磨纸粒度的增大呈先增大后减小的趋势，当光纤研磨纸的粒度为 9 μm 时，传感器的灵敏度最佳。先随着光纤研磨纸的粒度增大而增加，是因为光纤研磨纸的粒度越大，研磨后的光纤表面粗糙度越大，适当的光纤表面粗糙度将有助于提升光纤表面倏逝波的强度及透射深度[5,11-12]，从而提高传感器的灵敏度。然而，当光纤研磨纸的粒度大于 9 μm 时，传感器敏感区的表面粗糙度过大，降低了光纤内部传输的有效光强及光纤表面有效的倏逝场强度[11-12]，从而降低了传感器的灵敏度。当 D 形光纤传感器采用粒度为 9 μm 的光纤研磨纸研磨制备时，传感器的灵敏度达到 $-0.004\,5(\mathrm{mg/L})^{-1}$，是未经研磨传感器的 11.25 倍，且传感灵敏度 S 与葡萄糖浓度 c 间具有函数关系：$S=-0.004\,5c-0.007\,4$（$R^2=0.967\,8$）。

3 结论

本文采用了不同粒度光纤研磨纸对塑料光纤进行了侧边研磨，制备了不同直径及不同表面粗糙度的 D 形塑料光纤倏逝波传感器。实验观察了 D 形光纤的表面形貌，研究了传感器的光传输特性及其对葡萄糖溶液的响应灵敏度。研究发现：当采用粒度为 9 μm 的光纤研磨纸将光纤 D 区直径研磨至 1 200 μm 时，传感器灵敏度达到最大值：$-0.004\,5(\mathrm{mg/L})^{-1}$，是未经研磨传感器的 11.25 倍。该研究结果将有助于推动塑料光纤传感器在实际工程中的应用。

参考文献：

[1] Zhong N, Liao Q, Zhu X, et al. Temperature-independent polymer optical fiber evanescent wave sensor[J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 11508-11508.

[2] 张 鹏，王博思. 基于塑料光纤的智能交通移动边缘计算通信系统设计[J]. 半导体光电，2019，40(6)：886-890.
Zhang Peng, Wang Bosi. Design of a POF-based communication system for edge computing in intelligent transportation system [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(6): 886-890.

[3] 孔德鹏，张大明，袁 苑，等. 塑料光纤的研究与应用进展[J]. 光子学报，2019，48(11)：71-85.
Kong Depeng, Zhang Daming, Yuan Yuan, et al. Progress in research and applications of plastic optical fiber[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(11): 71-85.

[4] Aitkulov A, Tosi D. Optical fiber sensor based on plastic optical fiber and smartphone for measurement of the breathing rate[J]. IEEE Sensors J., 2019, 19(9): 3282-3287.

[5] Zhong N, Wang Z, Chen M, et al. Three-layer-structure polymer optical fiber with a rough inter-layer surface as a highly sensitive evanescent wave sensor[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 254: 133-142.

[6] 刘 婷，王文琪，刘志群，等. 基于量子点和倏逝波的汞离子检测光纤传感器[J]. 光学学报，2018，38(10)：122-127.
Liu Ting, Wang Wenqi, Liu Zhiqun, et al. Optical fiber sensor for mercury ion detection based on quantum dots and evanescent wave sensing[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(10): 122-127.

[7] 刘 婷，王文琪，刘志群，等. CdSe/ZnS 量子点在倏逝波光纤 pH 传感中的应用[J]. 光谱学与光谱分析，2018，38(6)：1944-1948.
Liu Ting, Wang Wenqi, Liu Zhiqun, et al. Applications of CdSe/ZnS quantum dot in optical fiber evanescent-wave pH sensing[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(6): 1944-1948.

[8] 胡新宇，田 霞，赵明富，等. 在线测量 Fe^{3+} 浓度的塑料光纤倏逝波传感系统[J]. 半导体光电，2017，38(5)：656-660，664.
Hu Xinyu, Tian Xia, Zhao Mingfu, et al. On-line measurement of Fe^{3+} concentration of evanescent wave sensing system based on plastic optical fiber biosensor [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017, 38(5): 656-660, 664.

[9] 庄须叶，吴一辉，王淑荣，等. 新结构 D 形光纤消逝场传感器[J]. 光学精密工程，2008，16(10)：1936-1941.
Zhuang Xuye, Wu Yihui, Wang Shurong, et al. Optical fiber

evanescent field sensor based on new type D-shaped fiber[J]. Optics and Precision Engin., 2008, 16(10): 1936-1941.

[10] 武　睿，王金春，杨　斌. 拉伸对光纤侧发光性能的影响[J]. 纺织学报，2011，32(7)：8-12.
Wu Rui, Wang Jinchun, Yang Bin. Influence of extension on side-glowing properties of polymer optical fiber[J]. J. of Textile Research, 2011, 32(7): 8-12.

[11] Zhong N, Liao Q, Zhu X, et al. High-quality fiber fabrication in buffered hydrofluoric acid solution with ultrasonic agitation[J]. Appl. Opt., 2013, 52(7): 1432-1440.

[12] Zhong N, Zhu X, Liao Q, et al. Effects of surface roughness on optical properties and sensitivity of fiber-optic evanescent wave sensors[J]. Appl. Opt., 2013, 52(17): 3937-3940.

作者简介：

冯利民(1975－)，男，湖北武汉人，硕士，讲师，智能光纤感知技术重庆市高校工程研究中心、重庆市光纤传感与光电检测重点实验室访问学者，研究方向为信息处理技术；

吴德操(1984－)，男，重庆人，博士，高聘副教授，研究方向为光纤传感器。

(上接第 797 页)

[6] Deng L, Shi H, Meng X, et al. Pure and stable top-emitting white organic light-emitting diodes utilizing heterojunction blue emission layers and wide-angle interference[J]. ACS Appl. Mater. & Interfaces, 2014, 6(7): 5273-5280.

[7] Park C H, Lee H J, Hwang J H, et al. High-performance hybrid buffer layer using 1, 4, 5, 8, 9, 11-hexaazatriphenylenehexacarbonitrile/molybdenum oxide in inverted top-emitting organic light-emitting diodes[J]. ACS Appl. Mater. & Interfaces, 2015, 7(11): 6047-6053.

[8] 谢嘉凤，王　振，陈　爱，等. 以 DCJTB 为颜色转换层的三原色 WOLED 研究[J]. 半导体光电，2019，40(5)：620-625.
Xie Jiafeng, Wang Zhen, Chen Ai, et al. Three primary-colored WOLED adopting DCJTB as color conversion layer[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(5): 620-625.

[9] Lu M H, Weaver M S, Zhou T X, et al. High-efficiency top-emitting organic light-emitting devices[J]. Appl. Phys. Lett., 2002, 81(21): 3921-3923.

[10] Chen S, Zhao Z, Jie Z, et al. A green top-emitting organic light-emitting device with improved luminance and efficiency [J]. J. of Physics D: Appl. Phys., 2006, 39(17): 3738-3741.

[11] Won C H, Young K S, Kim K, et al. Enhancement of hole injection using O_2 plasma-treated Ag anode for top-emitting organic light-emitting diodes[J]. Appl. Phys. Lett., 2005, 86(1): 12104.

[12] Hung L S, Tang C W, Mason M G, et al. Application of an ultrathin LiF/Al bilayer in organic surface-emitting diodes [J]. Appl. Phys. Lett., 2001, 78(4): 544-546.

[13] Lim J T, Lee J H, Yeom G Y, et al. Top-emitting organic light-emitting diodes with Ba/Ag/indium tin oxide cathode and built-in potential analyses in these devices[J]. J. of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces and Films, 2008, 26(4): 961-965.

[14] Chen S, Li X, Huang W. Blue top-emitting organic light-emitting devices using a 2, 9-dimethyl-4, 7-diphenyl-1, 10-phenanthroline outcoupling layer[J]. Organic Electron., 2008, 9(6): 1112-1117.

[15] Lee C J, Pode R B, Moon D G, et al. Realization of an efficient top emission organic light-emitting device with novel electrodes[J]. Thin Solid Films, 2004, 467(1): 201-208.

[16] Park M J, Kim S K, Pode R, et al. Low absorption semi-transparent cathode for micro-cavity top-emitting organic light emitting diodes[J]. Organic Electron., 2018, 52: 153-158.

[17] Peng H, Sun J, Zhu X, et al. High-efficiency microcavity top-emitting organic light-emitting diodes using silver anode [J]. Appl. Phys. Lett., 2006, 88(7): 73517.

[18] Han S, Huang C, Lu Z. Color tunable metal-cavity organic light-emitting diodes with fullerene layer[J]. J. of Appl. Phys., 2005, 97(9): 93102.

[19] Wu Y C S, Huang P. Effect of Ni thin film on the reflectivity of ITO/Ag mirrors of GaN light-emitting diodes [J]. Electrochemical and Solid-State Lett., 2008, 11(11): J82.

[20] Chen S, Xie W, Meng Y, et al. Effect of 2,9-dimethyl-4,7-diphenyl-1, 10-phenanthroline outcoupling layer on electroluminescent performances in top-emitting organic light-emitting devices[J]. J. of Appl. Phys., 2008, 103(5): 54506.

作者简介：

王　振(1982－)，男，博士，副教授，主要研究方向为半导体光电器件。