

# 光纤U型锥半径对光谱质量影响的理论仿真

李珊珊, 丛爱民, 白茹冰, 任芮昕, 黄国锋, 李红娟, 李敏\*

赤峰学院, 物理与智能制造工程学院, 内蒙古 赤峰

收稿日期: 2023年12月4日; 录用日期: 2024年1月3日; 发布日期: 2024年1月10日

## 摘要

U型光纤锥可以探测外界目标参量, 目前在国防安全、医疗健康、工农生产等领域有着重要的应用前景, 其相比未拉锥的U型光纤结构而言, 探测灵敏度显著提升。半径为影响U型光纤锥结构特性的一个重要参量, 因此, 本文利用Rsoft软件仿真U型光纤锥的半径对光谱质量的影响, 光纤锥的长度为628  $\mu\text{m}$ , 得到U型光纤锥的结构内部光路分布规律及光谱特征。最终, 得出半径在83.3  $\mu\text{m}$ ~1216  $\mu\text{m}$ 范围内时, 半径是1216  $\mu\text{m}$ 的光谱质量最好, 具有最优的探测效果。

## 关键词

光纤U型锥, Rsoft仿真, 半径

# Theoretical Simulation of the Influence of Fiber U-Shaped Taper Radius of Curvature on Spectral Quality

Shanshan Li, Aimin Cong, Rubing Bai, Ruixin Ren, Guofeng Huang, Hongjuan Li, Min Li\*

School of Physics and Intelligent Manufacturing Engineering, Chifeng University, Chifeng Inner Mongolia

Received: Dec. 4<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jan. 3<sup>rd</sup>, 2024; published: Jan. 10<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

U-type fiber taper can detect external target parameters. At present, it has an important application prospect in the fields of national defense security, medical health, industrial and agricultural production and other fields. Compared with the U-type fiber structure without taper, its detection sensitivity is significantly improved. The radius of curvature is an important parameter affecting the structural characteristics of U-type fiber taper. Therefore, this paper uses Rsoft software to

\*通讯作者。

文章引用: 李珊珊, 丛爱民, 白茹冰, 任芮昕, 黄国锋, 李红娟, 李敏. 光纤U型锥半径对光谱质量影响的理论仿真[J]. 应用物理, 2024, 14(1): 19-24. DOI: 10.12677/app.2024.141003

simulate the influence of the radius of curvature U-type fiber taper on the spectral quality. The length of the fiber taper is 628  $\mu\text{m}$ , and the internal light path distribution law and spectral characteristics of U-shaped fiber taper are obtained. Finally, it is concluded that when the radius of curvature is within 83.3  $\mu\text{m}$ ~1216  $\mu\text{m}$ , the curvature radius of 1216  $\mu\text{m}$  has the best spectral quality and the optimal detection effect.

## Keywords

Fiber U-Shaped Taper, Rsoft Simulation, Radius of Curvature

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 绪论

光纤传感器可以实现环境折射率[1]、温度[2]、应力[3]、PH值[4]的高灵敏传感探测，在国防安全、医疗健康、环境监测、工农生产等领域被广泛应用。同时，光纤具有极大的设计自由度，通过调整光纤形态结构及材料，可获得性能优异、灵敏度更高的光纤传感结构[5] [6]，当环境温度、压力、曲率等物理量发生变化时，光纤结构内部传输光的特征参量也随之变化。随着光纤技术工艺和理论研究的创新，光纤种类不断丰富，其应用领域也逐渐扩大。在广泛的探测领域，研究人员可通过拉锥[7]、级联[8]、刻蚀[9]、弯曲[10]等技术对光纤进行处理，破坏光的全透射传播途径，从而增强光与待测物的相互作用，提高光纤传感结构的灵敏度，得到不同形状的光纤结构，如S型[11]、花生型、U型[12]。其中U型光纤是一种常见的光纤传感结构[13]。其具有制作过程简单、机械强度好的特点，可根据不同的探测需求改变U型光纤的曲率从而得出更高灵敏度的光纤传感单元。光纤拉锥与弯曲技术具有相同的作用，二者均可通过改变光纤结构，据研究，U型光纤传感结构相比直型光纤结构而言，探测灵敏度提升了10倍[14]。锥形光纤的灵敏度极高且传感响应时间短[1]。2017年，天津大学报道了基于U型结构的单模光纤表面等离子共振折射率传感器[15]，对折射率灵敏度随U型光纤结构半径的变化趋势进行了探究。

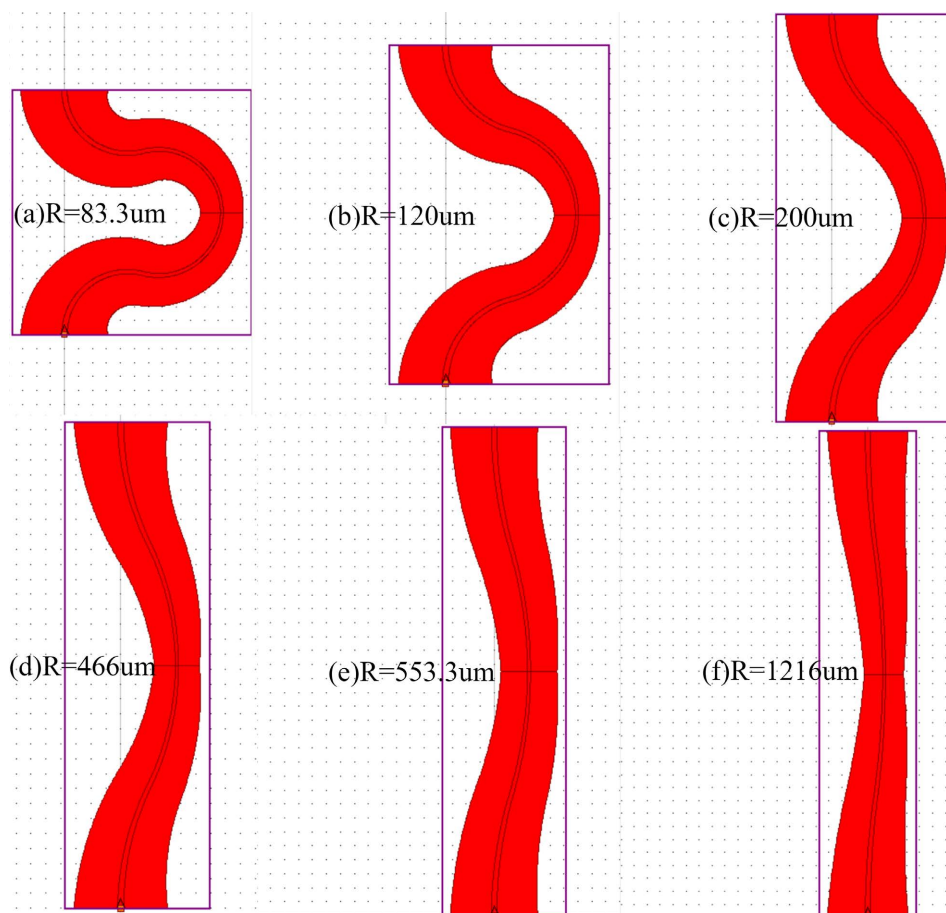
本文将光纤拉锥与弯曲技术相结合，采用U型光纤锥结构进行研究。曲率对于光纤传感器的传感性能起到极其重要的作用。为使光纤传感器探测功能最优，本文采用控制变量法，固定光纤锥长为628  $\mu\text{m}$ ，仅以曲率为唯一变量，在半径为83.3  $\mu\text{m}$ ~1216  $\mu\text{m}$ 的区段范围内，仿真分析光进入不同U型光纤锥结构中的传输路径。当U型光纤锥过长时其强度将会变弱，当其过短时光强泄露不够充分，将会影响探测结果，因此应用628  $\mu\text{m}$ 的U型光纤锥结构最佳。为更精准研究U型光纤锥结构半径对光谱特征的影响。通过利用基于光束传输法(Beam Propagation Method, BPM)的Rsoft软件对6种不同曲率的U型光纤锥结构的光传输效果进行仿真分析。主要从理论原理仿真研究方面论述，建立U型光纤锥结构的模型，构建出6组不同半径的U型光线锥结构，并理论推导出光束在U型光纤锥中的传输路径。同时，结合Rsoft软件仿真分析出进入不同半径的U型光纤锥结构中的光束的全透射光谱图的变化规律，得出U型光纤锥结构的光谱图随光纤弯曲曲率变化的规律，与不同半径的U型光纤锥结构的光束全透射光谱图变化规律。

## 2. U型光纤锥结构的模拟与分析

### 2.1. 建立模型

进入Rsoft CAD Layout，新建仿真文档，在2D维度下利用BeamPROP模拟工具对单模U型光纤锥

结构仿真分析。在此处对全局变量进行设置,自由空间波长为  $1.55\ \mu\text{m}$ ,背景折射率为 1。选择绘制 U 型光纤锥结构的部分并对其参数设置,纤芯折射率为 1.46,包层折射率为 1.45,固定光纤长度为  $628\ \mu\text{m}$ 。通过改变光纤 X、Y 方向的位移进而改变 U 型光纤锥结构的半径,由半径为  $83.3\ \mu\text{m}$  的 U 型光纤锥结构开始,对其在 X 轴正方向移动定值距离并在其 Y 轴负方向移动同样距离,由此不断增加半径,直至 U 型光纤锥结构半径为  $1216\ \mu\text{m}$ 。得出 6 组建模图,如图 1 所示。U 型光纤锥结构的半径分为  $83.3\ \mu\text{m}$ 、 $120\ \mu\text{m}$ 、 $200\ \mu\text{m}$ 、 $466\ \mu\text{m}$ 、 $553\ \mu\text{m}$ 、 $1216\ \mu\text{m}$ 。



**Figure 1.** U-shaped fiber cone modeling diagram at different radius of curvature: (a) Radius of curvature =  $83.3\ \mu\text{m}$ ; (b) radius of curvature =  $120\ \mu\text{m}$ ; (c) radius of curvature =  $200\ \mu\text{m}$ ; (d) radius of curvature =  $466\ \mu\text{m}$ ; (e) radius of curvature =  $553\ \mu\text{m}$ ; (f) radius of curvature =  $1216\ \mu\text{m}$

**图 1.** 不同半径下的 U 型光纤锥建模图: (a) 半径 =  $83.3\ \mu\text{m}$ ; (b) 半径 =  $120\ \mu\text{m}$ ; (c) 半径 =  $200\ \mu\text{m}$ ; (d) 半径 =  $466\ \mu\text{m}$ ; (e) 半径 =  $553\ \mu\text{m}$ ; (f) 半径 =  $1216\ \mu\text{m}$

## 2.2. 模拟检测路径

检测过程中 U 型光纤锥结构纵向排布,我们需要对纤芯进行实时检测,选择 Lanch Power 一种检测路径方式,以中间纤芯作为激光模式的入射路径,光束由 U 型光纤锥结构的下方输入,最终通过纤芯,自其上方输出。

## 2.3. 半径对光谱质量的影响

应用基模模式,同样设定以中间纤芯作为激光模式的入射中心,并以纤芯基模模式光作为入射光源

进行分析。选择标准网格密度，使仿真结构精准化，模拟分析得出光场强度分布图并分析 U 型光纤锥结构的内部光路的分布，如图 2 所示。图 2(a)~(f) 分别是半径为 83.3  $\mu\text{m}$ 、120  $\mu\text{m}$ 、200  $\mu\text{m}$ 、466  $\mu\text{m}$ 、553  $\mu\text{m}$ 、1216  $\mu\text{m}$  的 U 型光纤锥结构的光场强度分布图，其对应的光束强度及走向发生着规律性变化。半径最小时，光场中光束大量散出，随半径的增大光束逐渐集中到纤芯的传输路径中，光束的传输路径逐渐规律化，半径为 1216  $\mu\text{m}$  时具有最优的入射效果且功率最大，如图 2(f) 所示。

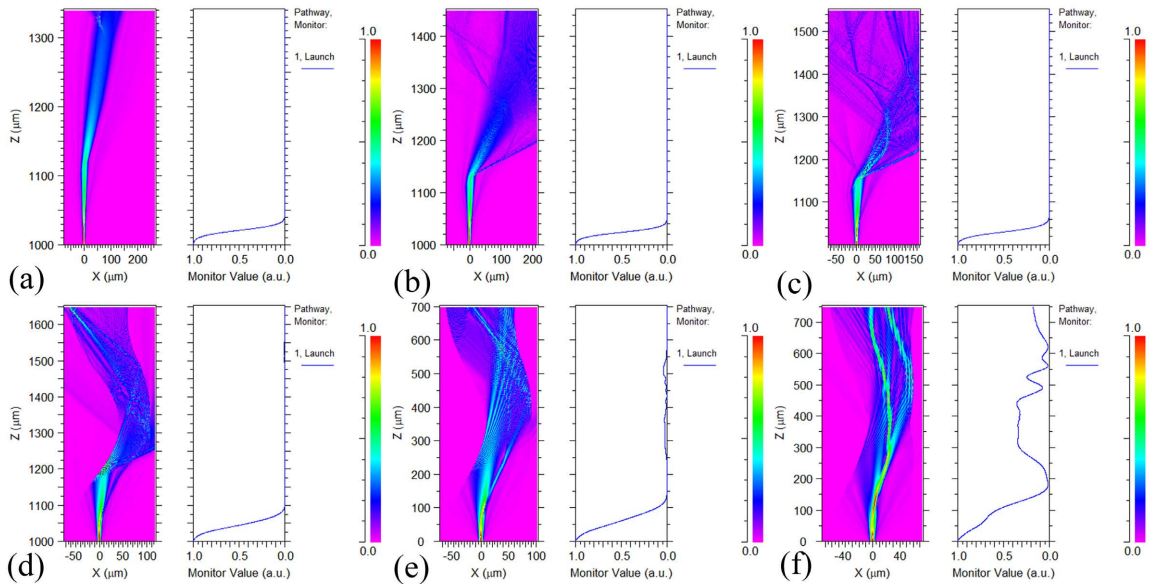


Figure 2. Distribution of U-fiber cone light fields at different curvature  
图 2. 不同半径下的 U 型光纤锥光场强度分布图

### 2.4. 半径对光谱质量的影响

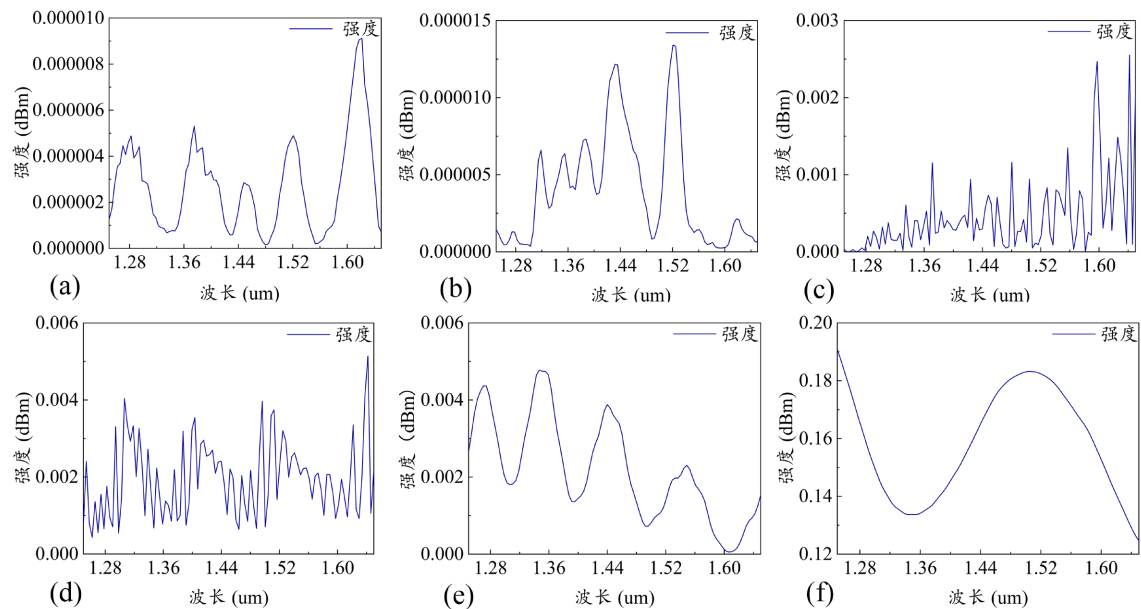


Figure 3. Transmission transmission spectrum of U-shaped fiber cones at different curvature  
图 3. 不同半径下的 U 型光纤锥透射光谱图

通过扫描多个光场强度分布, 最终得出 1250 nm~1650 nm 波长范围内的透射光谱图并进行分析, 图 3(a)~(f)与图 2(a)~(f)相对应。随半径的增大光谱特征也随之发生规律性变化, 由图 3 可知, 半径自 83.3  $\mu\text{m}$  至 1216  $\mu\text{m}$ , 随半径的增大光谱强度呈增长趋势, 同时吸收峰个数先增加后减少, 出现该现象的原因是, 随半径的增大, 光纤锥结构的弯曲变小, 因此弯曲损耗变小, 是光谱强度随半径增大的主要原因。同时, 该结构的干涉谱是光纤锥的芯模和包层模干涉获得, 当锥发生弯曲且半径不同时, 对应的包层模和芯模的光程差不同。因为锥长和弯曲半径同时会影响包层模和芯模的光程差, 因此, 半径由小增大时, 对应模式的光程差先变大后减小, 导致干涉谱中峰个数先增加后减少。当半径为 1216  $\mu\text{m}$  时光谱强度最强, 峰的个数最少, 仅有一个谐振峰。在测量波长范围内, 谐振峰个数越少, 探测目标参量的范围就越大。由此得出, 当 U 型光纤锥结构半径为 1216  $\mu\text{m}$  时, 具有最佳的探测范围与最优的传感效果。

### 3. 总结

本文用 Rsoft 软件对锥长为 62.8  $\mu\text{m}$  的光纤锥在不同半径下的光谱进行了分析, 给出了 U 型光纤锥的光束传输路径及光谱特征。仿真结果表明: 半径为 1216  $\mu\text{m}$  时结构的传输路径和光谱质量最优, 该研究为 U 型光纤锥用于传感时提供理论基础。

### 基金项目

赤峰学院重点实验室建设项目(CFXYZD202007); 内蒙古自治区高压相功能材料实验室建设项目(CFXY2014); 赤峰学院 2022 年度教育教学研究项目(JYJXZ202203); 内蒙古高校学生创新培训计划(S202310138020, S202310138003, S202210138012, S202210138013)。

### 参考文献

- [1] 陈海林, 江超, 郭小珊, 申万梅, 陶武强, 李宏. 同时测量温度与折射率的细芯锥形光纤传感器[J]. 电子器件, 2022, 45(1): 112-116.
- [2] 庄志康, 路元刚, 彭捷钦, 赫崇君. 聚酰亚胺涂覆的光纤宏弯温度传感器[J]. 光学学报, 2022, 42(7): 91-100.
- [3] 董雷岗. 基于马赫-曾德尔干涉结构的光纤应变传感器研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西北大学, 2020. <https://doi.org/10.27405/d.cnki.gxbdu.2020.000970>
- [4] 刘垦坤, 李梅月, 刘想, 霍香岩, 崔彬彬. 基于光子晶体光纤模间干涉仪的反射式光纤 pH 值传感器研究[J]. 计量技术, 2018(6): 3-6.
- [5] 武兴会. 一种新型的高灵敏度光纤传感器的研究[J]. 压电与声光, 2022, 44(5): 801-805.
- [6] 杨菁, 金缘, 叶鹏, 关春颖. 偏心孔辅助的双芯光纤器件及其应用研究[J]. 应用科学学报, 2021, 39(5): 858-880.
- [7] 董航宇, 孙四梅, 江超, 王解, 夏果, 刘昌宁, 黄会玲, 朱国良. 基于单模光纤拉锥构成的光纤折射率传感器[J]. 激光杂志, 2019, 40(6): 37-40. <https://doi.org/10.14016/j.cnki.jgzz.2019.06.037>
- [8] 朱永洁. 宏弯曲级联结构光纤传感器的制备及其折射率传感特性研究[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2022. <https://doi.org/10.27049/d.cnki.gglcd.2022.000695>
- [9] 周贤, 刘克非, 张欣, 张海波, 明兴祖. FBG 光纤的飞秒激光刻蚀特性及传感应用[J]. 包装学报, 2021, 13(6): 34-41.
- [10] 季彩虹, 江超, 郭小珊, 刘昌宁, 孙四梅. 弯曲与应变同时测量的光纤传感器[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(11): 81-84+88. [https://doi.org/10.13873/J.1000-9787\(2022\)11-0081-04](https://doi.org/10.13873/J.1000-9787(2022)11-0081-04)
- [11] Yang Zhao, Ai-Wu Li, Qi Guo, Xin-Yu Ming, Yong-Qin Zhu, Xiang-Chao Sun, Pu Li, Yong-Sen Yu. (2019) Relative Humidity Sensor of S Fiber Taper Based on Graphene Oxide Film. *Optics Communications*, **450**, 47-154. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2019.05.072>
- [12] Wang Rui, Liu Chunlan, Wei Yong, Jiang Tianci, Liu Chunbiao, Shi Chen, Zhao Xiaoling, Li Lingling. (2022) Research and Application of Multi-Channel SPR Sensor Cascaded with Fiber U-Shaped Structure. *Optik*, **266**, Article ID: 169603. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.169603>

- [13] 唐洁媛, 张佳佳, 曾央夫, 罗云瀚, 陈哲, 余健辉, 卢惠辉, 张军. 基于 U 型弯曲光纤模间干涉的折射率传感[J]. 光子学报, 2015, 44(5): 94-99.
- [14] 冯纪鑫. 基于 U 型光纤的混沌相关光纤环衰荡系统实现折射率传感[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2022. <https://doi.org/10.27352/d.cnki.gylgu.2022.000889>
- [15] 薛萌, 刘琨, 王涛, 常鹏翔, 江俊峰, 刘铁根. 基于 U 型结构的单模光纤 SPR 折射率传感器[J]. 光子学报, 2017, 46(10): 59-64.