

文章编号 1004-924X(2023)15-2171-10

用于 SS-OCT 成像系统的侧视型全光纤镜头及其聚焦性能

王 驰, 任丹阳*, 陈金波*, 张帅帅, 孙建美
(上海大学 精密机械工程系, 上海 200444)

摘要:为研制适用于扫频光学相干断层成像(Swept Source Optical Coherence Tomography, SS-OCT)系统的高性能侧视型全光纤镜头,分析了侧视型光纤镜头的性能影响因素及样品制作方法。对基于梯度折射率(Graded-Index, GRIN)光纤的侧视型全光纤镜头的光学模型进行解析,得出与侧视型全光纤镜头性能相关的特征参数。研究了“单模光纤+无芯光纤+GRIN 光纤+转角介质”四段式侧视型镜头各组件长度对其光学聚焦性能的影响,设计各组件的适宜长度范围。最后,制作了外径小至 0.5 mm、刚性长度 2.75 cm 的超小侧视型全光纤镜头样品,通过实验测得镜头的工作距离(0.52 mm)和光斑直径(26.82 μm),与理论分析结果基本一致,并将镜头样品集成于 SS-OCT 成像系统,获得了清晰的生物组织层析图像。实验结果表明,本文提出的分析方法可用于侧视型全光纤成像镜头结构参数的优化设计。

关键词:光学相干断层成像;光纤镜头;梯度折射率光纤;侧视成像

中图分类号:TN247;TB133 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20233115.2171

Side-viewing all-fiber lens and its focusing performance for SS-OCT imaging system

WANG Chi, REN Danyang*, CHEN Jinbo*, ZHANG Shuaishuai, SUN Jianmei

(Department of Precision Mechanical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

* Corresponding author, E-mail: rdy5200@163.com; jbchen@shu.edu.cn

Abstract: To develop high-performance side-viewing all-fiber lenses applicable to the swept-source optical coherence tomography (SS-OCT) system, the factors influencing the performance of a type of side-viewing all-fiber lens and the sample production methods were studied. First, the graded-index (GRIN) optical model of the side-viewing full-fiber lens with the GRIN fiber was analyzed, and the graded parameters related to the performance of the side-viewing full-fiber lens were obtained. Second, the effect of the length of each component of the four-stage side-viewing lens “SMF + NCF + GRIN fiber + Angle prism” on its optical focusing performance was studied, and the appropriate length range of each component was designed. Finally, an ultrasmall side-viewing all-fiber lens with an outer diameter as small as 0.5 mm and a rigid length of 2.75 cm was fabricated. Experimental results show that the working distance (0.52 mm) and spot diameter (26.82 μm) of the lens are consistent with the theoretical analysis results. The lens sample is integrated into the SS-OCT imaging system to obtain clear tomographic images of biological tis-

收稿日期:2023-01-17;修订日期:2023-02-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 62175144);上海市科技创新行动计划项目(No. 20142200100)

sues; thus, the performance of the designed lens is verified. The results indicate that the proposed method can be used to optimize the structural parameters of side-viewing all-fiber imaging lenses.

Key words: optical coherence tomography; optical fiber lens; GRIN fiber; side-viewing

1 引言

光学相干断层扫描技术(Optical Coherence Tomography, OCT)是一种基于低相干干涉仪和共焦显微技术的非入侵性成像方法,具有微米级的分辨率,能够对生物组织的微观结构进行层析成像,以用于临床诊断和病理学研究^[1]。扫频OCT(Swept Source OCT, SS-OCT)是一种使用扫频光源的频域OCT,具有快速成像的优点,常用于生物组织内窥检测。比如在经皮冠状动脉介入治疗中,SS-OCT系统可用于植入前血管状态评估和术后支架检测^[2]。但OCT技术的探测深度一般限于1~3 mm,为获得腔内狭小空间的生物组织图像,常将超小光学镜头嵌入OCT系统信号采集端。梯度折射率(Graded-Index, GRIN)透镜具有光束自聚焦特性,端面是平面且易于集成到内窥镜头中。Tearney等^[3]研制了基于GRIN透镜的OCT探头。Xie等^[4]开发了基于GRIN透镜的SS-OCT内窥成像系统,该系统可用于胸腔内的组织检测。上述报道的光学探头直径通常在数毫米量级,可用于生物体表、胸腔和大型腔道的成像检测,然而对于人类和小动物的组织狭缝、心血管和细小肠道的成像,直径过大的成像镜头的机械插入可能造成组织损伤。

GRIN光纤具有与GRIN透镜性能一致的自聚焦特性,裸纤直径接近125 μm,在侧视型全光纤镜头的设计中受到青睐。Yang等^[5-6]研发了基于GRIN光纤的全光纤镜头,并将它应用于羊肺和小鼠骨骼肌结构的成像。Ramakonar等^[7]利用GRIN光纤研发了一种用于识别有损伤风险的血管的侧视型OCT扫描镜头。Yuan等^[8]研制了一种外径为0.58 mm用于脑部无创诊断的探针。Kang等^[9]使用GRIN光纤设计了一种无间隔介质的用于冠状动脉成像的笔形扫描导管。上述报道着重研究了适用于SS-OCT成像镜头的小型化和结构简化方法,但关于侧视型全光纤镜头

的相关理论分析却鲜有报道,而对于长度不足1 mm的微小镜头,其结构组件的微小变化会较大程度上影响其成像性能。

本文在已有研究成果的基础上^[10-14],对侧视型全光纤镜头光学模型进行解析,探究侧视型全光纤镜头的结构组件与其光学聚焦性能的影响关系。设计并制作尺寸超小的侧视型全光纤镜头样品,将实测数据与理论值进行对比分析。最后,搭建基于侧视型全光纤镜头的SS-OCT成像系统,进行测试成像实验,进一步验证侧视型全光纤镜头的有效性和聚焦性能。

2 侧视型全光纤镜头的光学模型解析

根据文献[10,12],基于GRIN光纤的前向型光纤镜头的解析和设计方法,本文研究的侧视型全光纤镜头主要由单模光纤(Single Mode Fiber, SMF)、无芯光纤(Non-core Fiber, NCF)、GRIN光纤和由NCF研磨而成的转角介质(NCF Prism)组成,其光学模型如图1(a)所示。SMF作为侧视型全光纤镜头的传光入口,一端与SS-OCT系统的信号探测臂相连,另一端与NCF相连。NCF是一种折射率均匀的玻璃棒,通过它可以克服SMF模场直径有限(约为9 μm)的问题。GRIN光纤是侧视镜头的关键组件,其径向折射率分布近似为抛物线形状,可表示为:

$$n(r) = n_g \left(1 - \frac{g^2}{2} r^2 \right), \quad (1)$$

其中: n_g 表示GRIN光纤中心轴线的折射率, r 表示距离中心轴线的距离, g 为折射率变化常数。全光纤镜头各组件可通过电弧熔接集成。需要指出的是,GRIN光纤中心轴线的折射率与NCF和SMF纤芯的折射率应尽可能相等,而且NCF与SMF和GRIN光纤的接触面进行8°角研磨,以减小镜头内部复杂的反射作用对成像信号的干

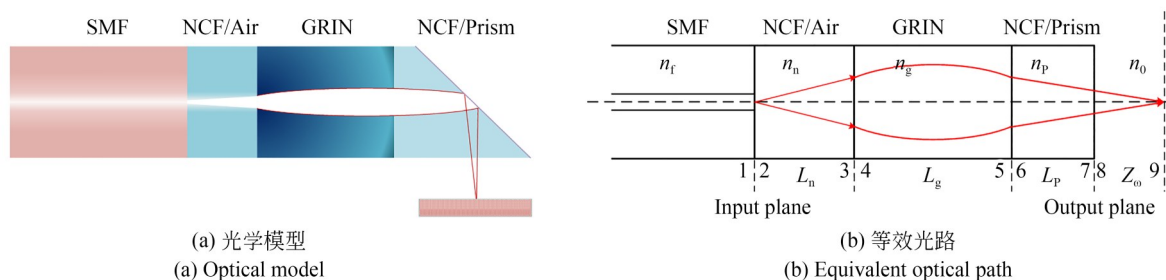


图 1 侧视型全光纤镜头模型与等效光路

Fig. 1 Side-viewing fiber lens model and equivalent optical path

扰。全光纤镜头的主要光学特征参数如下:(1)工作距离(z_w),表示聚焦光斑位置相对镜头输出平面之间的距离,用于表征配置该镜头的 SS-OCT 系统的工作距离;(2)聚焦光斑尺寸($2\omega_f$),表示高斯光束聚焦后的束腰直径,用于表征系统成像时的横向分辨率。根据图 1(b)所示的侧视型全光纤镜头的等效光路,设置高斯光束波长为 λ 、入射面高斯光束的束腰半径为 ω_1 、SMF 出射光束半径为 ω_1 、长度为 L_n 的 NCF 折射率为 n_n 、长度为 L_p 的 NCF Prism 折射率为 n_p 、GRIN 光纤的长度为 L_g 、SMF 的折射率为 n_f 、传出介质的折射率为 n_0 。结合文献[12],利用高斯光束的矩阵变换法^[15],令 $a = \frac{\lambda}{n_f \pi \omega_1^2}$,则侧视型全光纤镜头的工作距离(z_w)和聚焦光斑直径($2\omega_f$)可以用式(2)和式(3)描述。

$$z_w = \frac{n_0 \left[\left(1 + \left(\frac{an_f L_n}{n_n} \right)^2 - \left(\frac{an_f}{gn_g} \right)^2 \right) \sin(2gL_g) - 2 \frac{(an_f)^2 L_n}{n_n gn_g} \cos(2gL_g) \right]}{2gn_g \left[\sin^2(gL_g) + \left(\frac{an_f}{n_n gn_g} \right)^2 (n_n \cos(gL_g) - gn_g L_n \sin(gL_g))^2 \right]} - \frac{n_0 L_p}{n_p}, \quad (2)$$

$$2\omega_f = \frac{2an_f \omega_1}{gn_g \sqrt{\sin^2(gL_g) + \left(\frac{an_f}{n_n gn_g} \right)^2 (n_n \cos(gL_g) - gn_g L_n \sin(gL_g))^2}}. \quad (3)$$

2.1 NCF Prism 对侧视镜头聚焦性能的影响

NCF Prism 作为转角介质在侧视镜头中起到光路转折的作用,其长度在微米级别。根据式(2)~式(3),为进一步分析 NCF Prism 的折射率 n_p 和长度 L_p 对侧视镜头性能产生的影响,在 GRIN 光纤长度为 110 μm 、NCF 长度为 360 μm 时,使用 MATLAB 软件对转角介质与镜头性能的关系进行数值分析,结果如图 2 所示。根据图

根据式(2)~式(3),在“SMF+NCF+GRIN 光纤+NCF Prism”四段式侧视型镜头设计中,各组件的变化皆会影响其性能。在确定 NCF、GRIN 光纤和高斯光束参数的情况下,工作距离与 NCF Prism 的长度 L_p 呈负相关、与 NCF Prism 折射率 n_p 的倒数也呈负相关,而 NCF Prism 参数的变化与聚焦光斑大小无关;在确定 NCF Prism 参数的情况下,侧视镜头的工作性能受到 GRIN 光纤长度 L_g 和 NCF 长度 L_n 的综合影响。为便于研究分析,本文设定高斯光束波长为 1 310 nm,入射面高斯光束的束腰半径为 4.5 μm ,SMF、NCF、NCF Prism 和 GRIN 光纤的中心轴线折射率均为 1.486,工作介质定为空气(折射率为 1),GRIN 光纤折射率常数 g 为 5.5 mm^{-1} 。

2(a),当 NCF Prism 长度确定时,侧视型全光纤镜头的工作距离随着转角介质折射率的增加而增加,工作距离与转角介质的折射率成反比,这表明转角介质的折射率越高,镜头的工作距离越大。图 2(b)同样表明,在 NCF Prism 长度一定时,转角介质的折射率越大,镜头的工作距离越大;并且工作距离与转角介质的长度成正比。图 2(c)表明,无论转角介质的折射率如何变化,镜

头出射光斑的尺寸不变,这意味着成像系统的横向分辨率与转角介质的折射率无关。

根据上述分析并结合式(2)~式(3),在设计侧视型镜头时选用长度较短但折射率高的转角

介质,有益于提高镜头的工作距离,但转角介质需要与 GRIN 光纤进行精密熔接,因此设计侧视镜头在考虑 NCF Prism 全反射研磨角的同时,应使转角介质的长度与 GRIN 光纤直径接近。

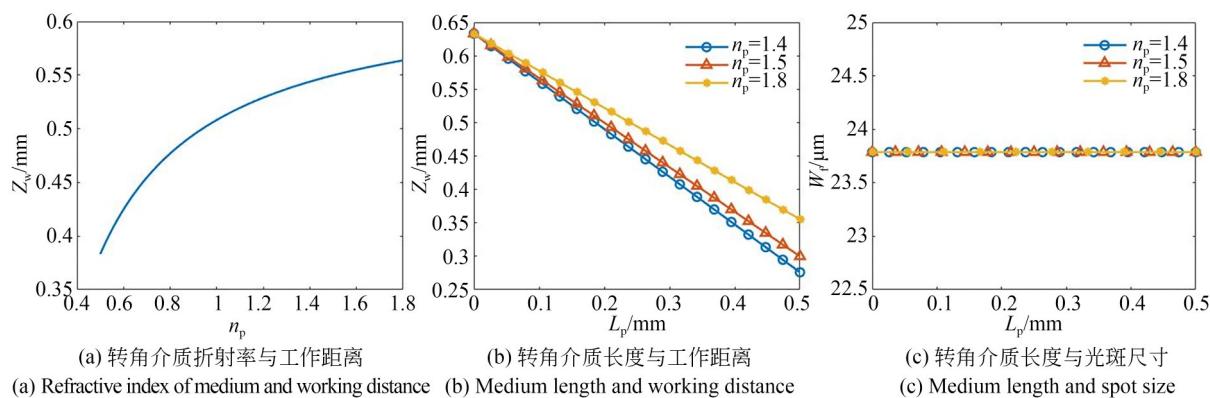


图 2 侧视镜头工作性能与转角介质的关系

Fig. 2 Relations of working performance of side-viewing lens and corner media

2.2 GRIN 光纤长度和 NCF 长度对侧视镜头聚焦性能的综合影响

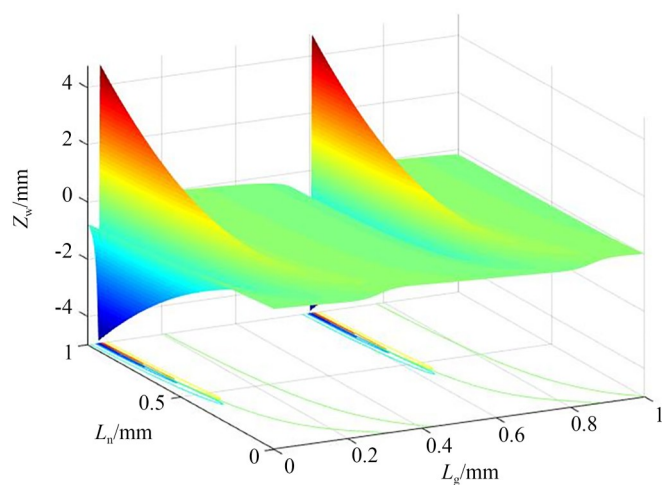
通过上述分析,使用折射率为 1.486、直角边长度为 $125\ \mu\text{m}$ 的 NCF Prism 作为转角介质,以更好地与 GRIN 光纤进行精密熔接,GRIN 光纤折射率常数 g 为 $5.5\ \text{mm}^{-1}$ 。在此设定下,进一步分析 GRIN 光纤长度和 NCF 长度与侧视镜头工作性能之间的关系,其数值计算结果如图 3 所示。基于图 3 所示的数值分析结果,结合文献[12]分析得出以下结论:(1)在设计侧视型全光纤镜头时,NCF 作为扩束隔片,可以改善镜头的聚焦性能,在保持聚焦光斑尺寸较小的情况下增加工作距离;(2)侧视镜头的工作距离和光斑尺寸会随着 GRIN 光纤长度的增加呈现周期性变化;(3)侧视镜头的工作距离和光斑尺寸会因 GRIN 光纤长度的增加而急剧变化,这与 GRIN 光纤的节距($P=2\pi/g$)有关;(4)在一定的 GRIN 光纤长度范围内,随着 NCF 长度的增加,侧视镜头工作距离增加的同时,光斑尺寸也会增大。

因此,利用侧视镜头工作性能呈周期性变化的特点,适当增加 GRIN 光纤的长度以降低制作侧视镜头的难度。在保证聚焦光斑足够小的情况下应尽可能增加工作距离,侧视型光纤镜头需

同时满足聚焦光斑足够小(小于 $40\ \mu\text{m}$)、工作距离足够大(大于 $0.4\ \text{mm}$)的要求。为了制作精度更高的侧视镜头,应当使 GRIN 光纤的长度不在使镜头工作距离和光斑尺寸急剧变化的范围内。

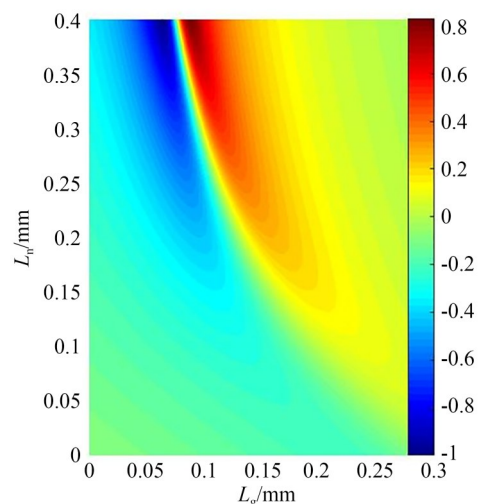
依据上述分析,对图 3(b)和图 3(d)所表示的区间数据进行分析,为使侧视镜头的工作距离足够大,NCF 的长度越长越好,但由于 GRIN 光纤有纤芯限制,过长的 NCF 会导致光路过度扩束,并不能提高镜头的工作性能。根据文献[16],使用芯径为 $50\ \mu\text{m}$ 的 GRIN 光纤,NCF 长度应接近 $0.363\ \text{mm}$ 。根据图 3 的数据结果,当侧向镜头的工作距离大于 $0.4\ \text{mm}$ 时,GRIN 光纤长度应在 $88\sim 123\ \mu\text{m}$ 。值得注意的是,在此长度区间的部分范围内侧向镜头的工作距离变化过于剧烈。为更加全面地分析 GRIN 光纤长度和 NCF 长度对探头聚焦性能的综合影响,根据文献[10]提出的偏导数分析法,结合式(2)~式(3),当 NCF 长度为 $0.36\ \text{mm}$ 时,得出侧视镜头的工作性能参数的变化率与相对应 GRIN 光纤长度和 NCF 长度的关系,如图 4(a)~4(b)所示;当 GRIN 长度为 $0.11\ \text{mm}$ 时,侧视镜头的工作性能参数的变化率与相对应 GRIN 光纤长度和 NCF 长度的关系,如图 4(c)~4(d)所示。

根据图 4(a),当 GRIN 光纤长度在 $88\sim$



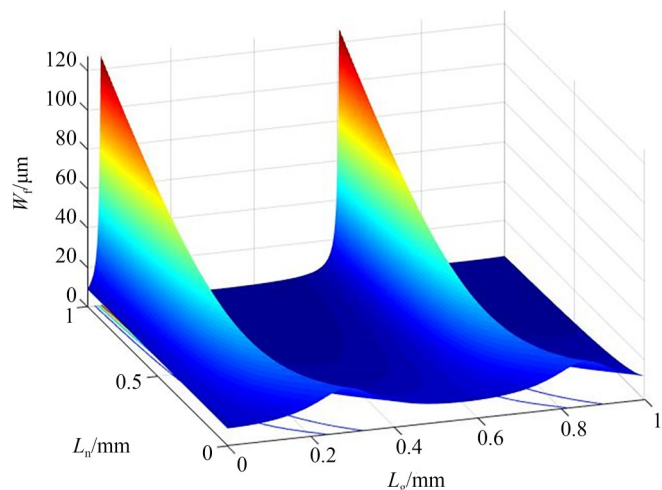
(a) 工作距离与NCF和GRIN光纤的长度关系

(a) Relationship between working distance and length of NCF and CRIN fibers



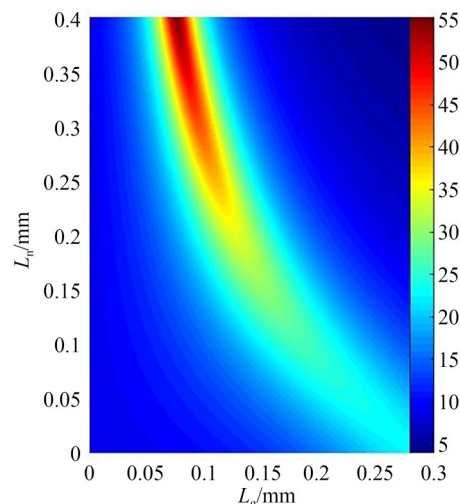
(b) 工作距离的投影

(b) Projection of working distance



(c) 光斑尺寸与NCF和GRIN光纤的长度关系

(c) Relationship between spot size and length of NCF and CRIN fibers

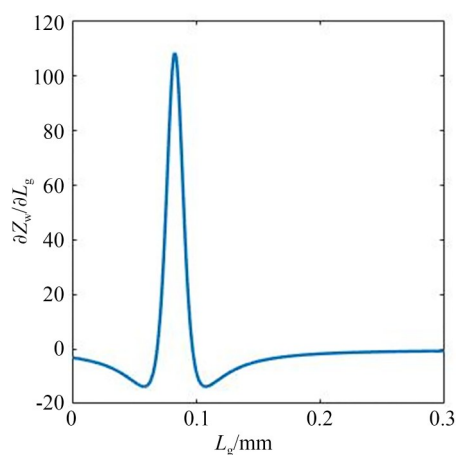


(d) 光斑尺寸的投影

(d) Projection of spot size

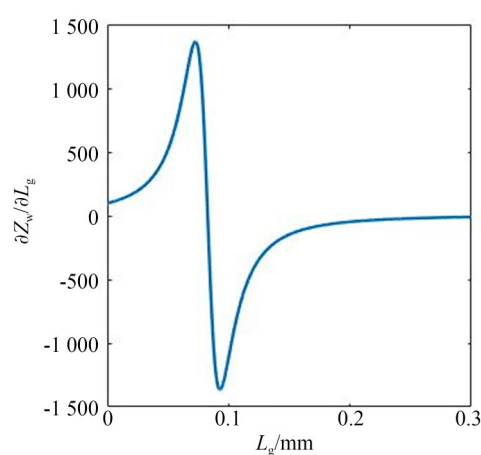
图 3 GRIN 光纤长度和 NCF 长度与侧视镜头工作性能的关系

Fig. 3 Relationship of GRIN fiber length and NCF length with side-viewing lens performance



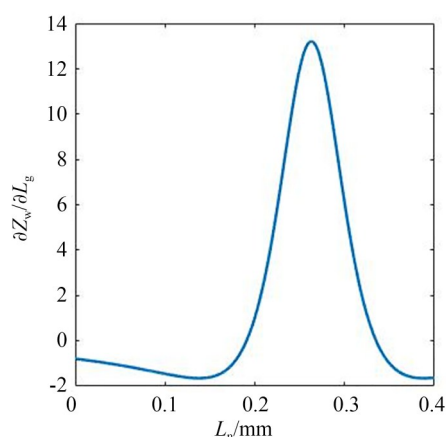
(a) 工作距离的变化率与GRIN光纤长度

(a) Change rate of working distance relative to length of GRIN fiber



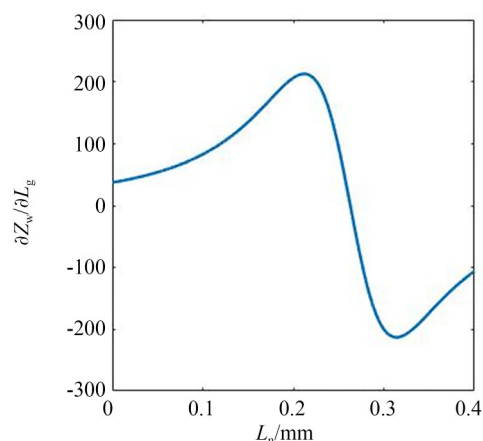
(b) 光斑尺寸的变化率与GRIN光纤长度

(b) Change rate of spot size relative to length of GRIN fiber



(c) 工作距离的变化率与NCF的长度

(c) Change rate of working distance relative to length of NCF fiber



(d) 光斑尺寸的变化率与NCF的长度

(d) Change rate of spot size relative to length of NCF fiber

图 4 侧视镜头工作性能参数的变化率与 GRIN 光纤和 NCF 长度的关系

Fig. 4 Effect of GRIN fiber and NCF length on change rate of lens operating performance

94 μm 时,侧视镜头的工作距离相对于 GRIN 长度的变化速率大于 20,这意味着在进行光纤切割和熔接时,较小的误差会导致侧视镜头工作距离的极大差异,因此 GRIN 光纤的设计长度进一步缩小至 94~123 μm 。根据图 4(d),考虑镜头聚焦光斑应尽量小于 40 μm ,GRIN 光纤的设计长度应进一步限制在 95~123 μm 。根据图 4(b)可知,GRIN 光纤处于 95~123 μm 的长度时,侧视镜头光斑尺寸的变化速率的绝对值随 GRIN 光纤的增大而减小,因此 GRIN 的长度应接近 123 μm 。而图 4(c)~4(d)表明,当 NCF 长度大于 0.314 mm 时,随着 NCF 的增加,镜头工作距离和光斑尺寸变化率的绝对值都会随之减小。

3 侧视型全光纤镜头的制作与检测

根据上述分析得出的 NCF Prism, NCF 和 GRIN 光纤长度的范围,制作“SMF+NCF+GRIN 光纤+NCF Prism”四段式全光纤型侧视镜头,其组件包括 350 μm 的 NCF(Prime, 中国台湾)、110 μm 长的 GRIN 光纤(50/125 μm)、15 mm 的 SMF(Corning SMF-28, 美国)以及长度为 125 μm 的 NCF。图 5(a)展示了侧视型全光纤镜头的制作过程,图 5(b)是具备光纤精密熔接与显微切割功能的一体机,其单次熔接损失为 0.01~

0.04 dB。首先对镜头末端 SMF 与 NCF 进行精密熔接获得熔接点 A,以点 A 为起点,对 NCF 进行精密切割,保留 NCF 长度至设计范围,依据此方法,依次熔接 GRIN 光纤、NCF,最后对镜头末端 NCF 进行 45°研磨抛光以获得 NCF Prism,并使用光学黏合剂对镜头样品进行封装。图 5(c)~5(e)展示了显微镜下的侧视镜头样品、侧视镜头样品的光斑效果和使用光学黏合剂封装后的镜头。

为测定侧视型全光纤镜头的工作性能,首先需确定镜头的工作距离,使用波长为 1 310 nm 的激光器(SLD-1310-18, FiberLabs)作为光源,将高反光铜镜作为待测物,利用功率计检测通过环形器(CIR-1310-50, Thorlabs)的返回光强度,轴向移动高反光铜镜,当返回光最强时,探头端面距离平面镜的距离为实测工作距离^[17]。由于镜头的工作距离与出射光斑尺寸是一组关联数据,在确定工作距离后,固定反光铜镜与镜头端面的轴向距离,利用刀口法,通过横向移动高反光镜,获得有效光斑横向边界,光斑穿越的横向界面长度即为侧视镜头的光斑尺寸。图 6 展示了镜头性能测试方法。

基于本文对侧视型镜头性能参数的分析,将本文制作的镜头、已知的镜头数据^[18-19]与数值计算结果进行比较分析,结果如表 1 所示。工作距离和光斑尺寸的实验测试结果与数值

计算结果基本一致,表明本文提出的侧视型全光纤镜头的分析方法可行有效。数值间的微小差异来源于实验系统的制造和测量误差。

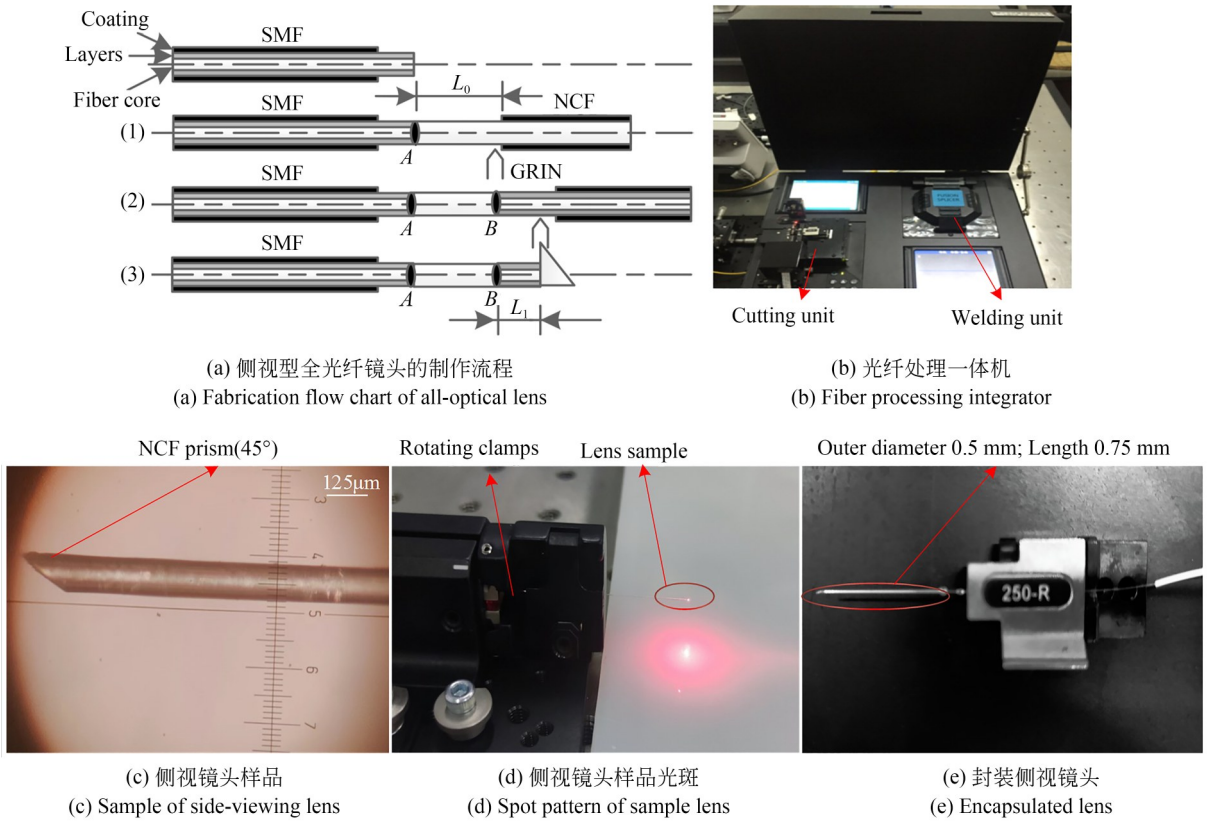


图 5 侧视型全光纤探头的研制
Fig. 5 Development of side-viewing all-fiber probe

表 1 实验数据和数值分析结果的对比
Tab. 1 Comparison of experimental and numerical results

Sample	g/mm^{-1}	L_n/mm	L_g/mm	$L_p/\mu\text{m}$	Z_w/mm		$W_t/\mu\text{m}$	
					Experimental	Simulated	Experimental	Simulated
1	5.5	0.36	0.11	0	0.60	0.63	28.10	23.78
2	5.5	0.35	0.11	125	0.52	0.56	26.82	25.44
3 ^[18]	5.5	0.36	0	0	0.50	0.51	23.00	18.38
4 ^[19]	0.59	0.50	2.46	1000	2.71	2.62	21.24	22.25

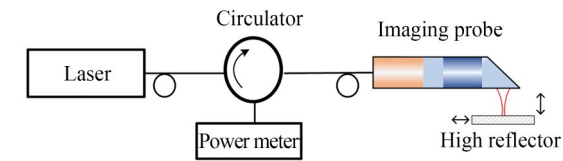


图 6 侧视型镜头性能测试方法
Fig. 6 Test method for side-viewing lens performance

4 基于侧视型全光纤镜头的 SS-OCT 系统成像

将制作的侧视型全光纤镜头(表 1 中 Sample 2)与 SS-OCT 系统相结合,搭建如图 7 所示的 SS-OCT 成像系统,其扫频光源(HSL-20-50-B, Santec)的扫频速率为 50 kHz,最大输出功率为

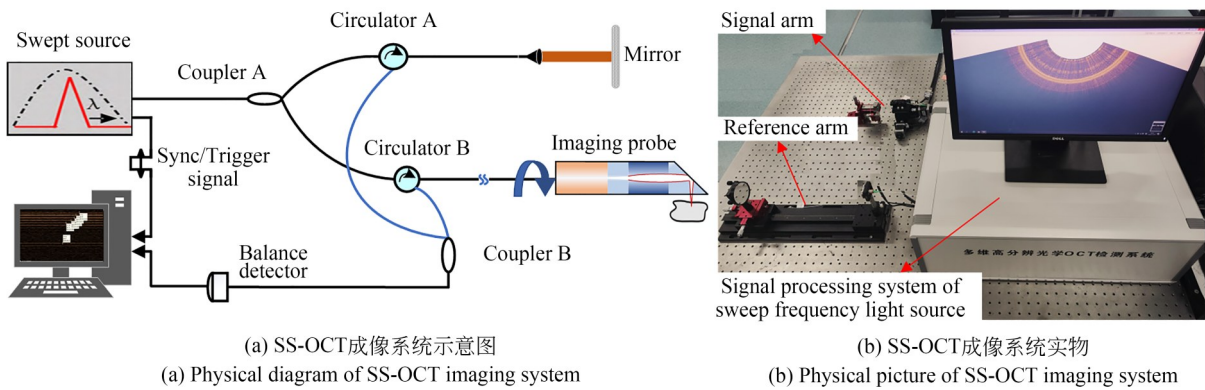


图 7 基于全光纤侧视镜头的 SS-OCT 成像系统

Fig. 7 SS-OCT imaging system based on side-view all-fiber lens

54.6 mW, 中心波长为 1 300.4 nm, 带宽为 106.3 nm。扫频光源的光束被 50/50 的光纤耦合器 A (TW1300R5A2, Thorlabs) 分开, 分别进入参考臂和信号臂。参考臂由准直器和平面镜组成, 侧视镜头作为信号采集端, 由旋转夹具固定后通过转接器与 SS-OCT 相连组成样品臂。两个环形器 (CIR-1310-50-APC, Thorlabs) 将从样品臂和参考臂的背向返回光引入光纤耦合器 B 中进行干涉, 干涉信号由光电平衡探测器 (PDB470C, Thorlabs) 接收处理后传入计算机高速采集卡 (ATS9870-003, AlazarTech) 进行数据同步采集, 最后利用计算机进行图像重建。

首先对标准玻璃片进行轴向扫描 (A-scan) 后, 进行数据处理和二维图像重建^[20], 结果如图 8 所示。玻璃片分层结构在图像中清晰可见, 其中 $Y=1\ 250$ 和 $Y=1\ 285$ 处分别表示第四块玻璃片的上下表面坐标, 图像结果在像素上相差 35 pixel, 对应的实物厚度为 $172.67\ \mu\text{m}$, 与该玻璃片 (CG15KH1, Thorlabs) 的标称厚度 (170 ± 5) μm 基本一致, 验证了本文研究的侧视镜头用于 SS-OCT 系统成像的可行性。

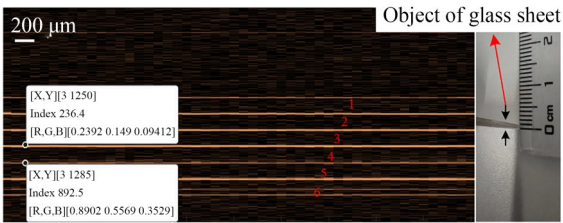


图 8 标准玻璃片层析图

Fig. 8 Standard glass slice chromatography

为进一步检验基于侧视镜头的 SS-OCT 系统对生物组织的成像能力, 本文对猪小肠黏膜进行了成像实验, 通过玻璃支撑物将猪小肠黏膜进行固定, 侧视镜头由小肠黏膜内侧进行周向扫描成像。图 9 是猪小肠黏膜的扫描图像, 通过图像矩阵进行极坐标变换后重建获得, 以角度极坐标形式展现。图中高亮部分为油脂 (F)、玻璃支撑物 (G), 在 F 与 G 之间为内层小肠黏膜, I 与 G 之间为外层小肠黏膜, 其余部分为空气层 (A)。因此, 本文研制的侧视镜头可用于 SS-OCT 系统的高精度成像, 并且有望进一步应用于管腔类狭小生物组织的成像检测。

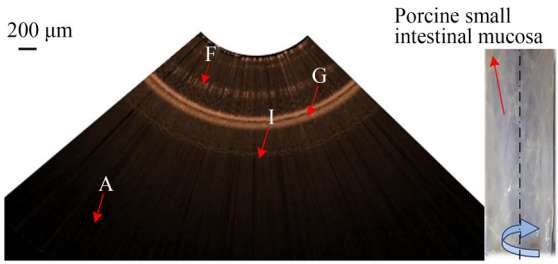


图 9 猪小肠黏膜周向扫描图

Fig. 9 Circumferential scanning image of porcine small intestinal mucosa

5 结 论

本文对适用于 SS-OCT 成像的侧视型全光纤镜头的光学模型进行解析, 从理论上研究了转角介质、NCF 和 GRIN 光纤对其成像性能相关光学参数的影响关系。分析得出在设计侧视型全光纤镜头时, 各组件的变化会极大地影响镜头性

能,并给出各组件的长度范围。将镜头数据与本文的数值计算结果进行比较,验证了本文分析方法的可靠性。最后,制作全光纤侧视镜头样品,其实测工作距离为 0.52 mm,聚焦光斑为

26.82 μm ,并将该镜头用于 SS-OCT 系统,获得了标准玻璃和猪小肠黏膜的层析图像,验证了本文研究方法在设计制作适用于 SS-OCT 系统成像的侧视型镜头的可行性。

参考文献:

- [1] KIM J, BROWN W, MAHER J R, *et al.* Functional optical coherence tomography: principles and progress [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2015, 60(10): R211-R237.
- [2] JIA H B, DAI J N, HE L P, *et al.* EROSION III: a multicenter RCT of OCT-guided reperfusion in STEMI with early infarct artery patency[J]. *JACC Cardiovascular Interventions*, 2022, 15 (8) : 846-856.
- [3] TEARNEY G J, BOPPART S A, BOUMA B E, *et al.* Scanning single-mode fiber optic catheter-endoscope for optical coherence tomography [J]. *Optics Letters*, 1996, 21(7): 543-545.
- [4] XIE T Q, LIU G J, KREUTER K A, *et al.* In vivo three-dimensional imaging of normal tissue and tumors in the rabbit pleural cavity using endoscopic swept source optical coherence tomography with thoracoscopic guidance[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2009, 14(6): 064045.
- [5] LORENSER D, YANG X, KIRK R W, *et al.* Ultrathin side-viewing needle probe for optical coherence tomography [J]. *Optics Letters*, 2011, 36 (19): 3894-3896.
- [6] YANG X J, LORENSER D, MCLAUGHLIN R A, *et al.* Imaging deep skeletal muscle structure using a high-sensitivity ultrathin side-viewing optical coherence tomography needle probe[J]. *Biomedical Optics Express*, 2014, 5(1): 136-148.
- [7] RAMAKONAR H, QUIRK B C, KIRK R W, *et al.* Intraoperative detection of blood vessels with an imaging needle during neurosurgery in humans [J]. *Science Advances*, 2018, 4(12): eaav4992.
- [8] YUAN W, CHEN D F, SARABIA-ESTRADA R, *et al.* Theranostic OCT microneedle for fast ultrahigh-resolution deep-brain imaging and efficient laser ablation *in vivo* [J]. *Science Advances*, 2020, 6 (15): eaaz9664.
- [9] KANG J Q, ZHU R, SUN Y X, *et al.* Pencil-beam scanning catheter for intracoronary optical coherence tomography [J]. *Opto-Electronic Advances*, 2022, 5(3): 200050.
- [10] WANG C, BI S B, XIA X Q, *et al.* Further analysis of focusing performance of an ultra-small gradient-index fiber probe [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(1): 013106.
- [11] WANG C, KUANG B, WEN Z L, *et al.* Further study of coupling efficiency of ultra-small gradient-index fiber probe[J]. *Optik*, 2019, 184: 304-312.
- [12] WANG C, FANG C, TANG Z, *et al.* Analytical method for designing gradient-index fiber probes [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(9): 62-65.
- [13] 王驰, 许婷婷, 毕书博, 等. 测量自聚焦光纤透镜聚焦常数的曲线拟合算法[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(12): 3309-3315.
- WANG CH, XU T T, BI SH B, *et al.* Curve-fitting algorithm of measuring focusing constant of gradient-index fiber lens [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(12): 3309-3315. (in Chinese)
- [14] 王驰, 陈伟, 孙建美, 等. 基于超小 GRIN 光纤镜头的 MEMS 光纤声传感器及性能测试方法 [J]. *光学精密工程*, 2022, 30(12): 1406-1417.
- WANG CH, CHEN W, SUN J M, *et al.* MEMS fiber optic acoustic sensor and performance testing method based on ultra-small GRIN fiber lens [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(12): 1406-1417. (in Chinese)
- [15] KOGELNIK H, LI T. Laser beams and resonators [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1966, 54 (10) : 1312-1329.
- [16] WANG C, MAO Y X, TANG Z, *et al.* Numerical analysis of GRIN lens based miniature probes for optical coherence tomography [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(9): 2300-2307.
- [17] RYU S Y, CHOI H Y, NA J, *et al.* Lensed fiber probes designed as an alternative to bulk probes in optical coherence tomography [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(10): 1510-1516.
- [18] MAO Y X, CHANG S D, SHERIF S, *et al.* Graded-index fiber lens proposed for ultrasmall probes used in biomedical imaging [J]. *Applied*

- Optics*, 2007, 46(23): 5887.
- [19] WU T, PAN R B, CAO K, *et al.* Side-viewing endoscopic imaging probe for swept source optical coherence tomography [J]. *Optics Communications*, 2020, 467: 125596.
- [20] 杨帆, 刘连圣, 翟祚盼, 等. 发散扫描模式下 OCT 图像畸变分析与矫正[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(8):1968-1975.
- YANG F, LIU L SH, ZHAI Z P, *et al.* Distortion analysis and reconstruction of OCT image in sector scan mode [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(8):1968-1975. (in Chinese)

作者简介:



王 驰(1982—),男,河南周口人,教授,博士生导师,2004年于河南科技大学获得学士学位,2009年于天津大学获得博士学位,主要从事光纤传感与融合技术的研究。E-mail: wang-chi@shu.edu.cn

通讯作者:



陈金波(1980—),男,内蒙古人,工程师,2002年、2014年于上海大学分别获得硕士和博士学位,主要从事机器视觉与光纤传感等方面的研究。E-mail: jbchen@shu.edu.cn