

超小自聚焦光纤探头研究用场追迹数值模拟技术*

王驰^{1)2)†} 毕书博¹⁾ 王利³⁾ 夏学勤¹⁾ 丁卫¹⁾ 于瀛洁¹⁾

1 (上海大学精密机械工程系, 上海 200072)

2 (精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津大学, 天津 300072)

3 (中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

(2012年5月21日收到; 2012年7月13日收到修改稿)

研究场追迹数值模拟技术在超小自聚焦光纤探头设计与分析中的应用方法. 首先, 论述场追迹的概念及其基本原理; 其次, 论述场追迹在 VirtualLab 软件中的实现方法; 最后, 研究超小自聚焦光纤探头在基于场追迹的物理光学软件 VirtualLab 中的建模与分析方法, 并进行仿真结果与实验结果的比较分析. 结果显示, 如设无芯光纤的长度为 0.36 mm, 自聚焦光纤透镜的长度分别为 0.10, 0.11 和 0.12 mm, 计算所得的工作距离分别为 0.75, 0.63 和 0.51 mm, 光斑尺寸分别为 32, 24 和 19 μm . 理论计算结果与实验结果符合, 表明基于场追迹的数值模拟技术是研究超小自聚焦光纤探头设计与分析方法的一个有效手段.

关键词: 场追迹, 光学探头, 数值模拟技术, 光学相干层析技术

PACS: 42.81.Ht, 42.15.Eq, 02.60.Cb, 42.60.Jf

DOI: 10.7498/aps.62.024217

1 引言

光学相干层析技术 (optical coherence tomography, OCT) 由于高分辨率、非接触及速度快等成像特征^[1], 已发展成为一种新兴、有效的医学映像手段. 其中, 光学探头是 OCT 系统的一个关键环节, 它一方面把光源光束聚焦到待测组织样品, 另一方面搜集携带生物组织信息的反射或散射光并将其传回信号处理单元. 因此, 光学探头的聚焦性能对 OCT 系统的成像质量有重要影响, 如光源光束通过光学探头后的聚焦位置和聚焦光斑大小在很大程度上影响 OCT 系统的探测深度和成像的横向分辨率. 然而, 由于大多数生物组织的高散射性以及光对非透明固体材料穿透性差等原因, OCT 系统的探测深度一般限于 1—3 mm, 目前主要用于生物表层或透明组织的成像研究和应用.

可用于内窥环境的小型或超小型 OCT 系统及其探头的研究正逐渐成为该领域的一个重要方向. 其中, 基于梯度折射率透镜 (gradient-index lens) 或

自聚焦透镜 (self-focusing lens) 的小型化探头得到了众多学者的青睐. 比如: Xie 和 Guo 等设计了带有动态跟踪功能的内窥式 OCT 用自聚焦光学探头^[2-4]; Singh 等研究了带有微扫描镜的小型化 OCT 探头^[5]; Aljaseem 等研究了尺寸在 4 mm 量级的内窥式光学探头^[6]; Meemon 等研究了用于高分辨率 OCT 成像系统的动态聚焦导管^[7]; Min 等提出了手持式光纤扫描探头^[8]; Jung 等报道了自聚焦光学探头的数值分析方法^[9]; Boppart 课题组研究了基于梯度折射率镜头的内窥式 OCT 导管成像横向分辨率的主要影响因素等^[10]. 上述探头的尺寸在数毫米量级, 近年来又出现了基于梯度折射率光纤的全光纤型超小光学探头. 如 Hudelist 等研究了纳米结构椭圆自聚焦微透镜的设计理论及制作方法^[10,11]; 美国 LightLab Imaging 有限公司的 Swanson 于 2002 年申请了基于自聚焦光纤的超小光学探针专利^[12], 后来被 Reed 和 Jafri 等加以利用, 研究了活体、在线检测的 OCT 系统方案^[13,14]; 自 2007 年, Mao 研究了超小自聚焦光纤镜头的制作方法^[15,16].

* 国家自然科学基金 (批准号: 41104065)、精密测试技术及仪器国家重点实验室开放基金、上海市“晨光计划” (批准号: 12CG47) 和上海市教育委员会科研创新项目 (批准号: 13YZ22) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: wangchi@shu.edu.cn

然而, 他们均未给出全光纤型超小光学探头详细的理论解析和设计方法. 文献 [17—19] 虽论述了这种探头设计的解析方法以及性能检验的数值分析技术, 但所用的方法存在程序复杂、不适于探头的快速设计等问题. 为此, 本文基于计算机技术和光学软件技术发展的最新研究成果, 把文献 [20] 描述的场追迹 (field tracing) 光学建模与分析技术引入到超小自聚焦光纤探头的研究方法之中, 并利用基于场追迹的商用光学软件 VirtualLab 实现对这种超小探头的设计与性能检验, 从而为这种超小光学探头的快速设计与制作提供一种理论基础和技术手段.

2 场追迹数值建模技术的基本原理

基于计算机的数值模拟技术是光学系统建模与分析的有效工具, 然而, 现代光学系统通常由传统的光学元件 (如透镜或棱镜等) 与小尺寸的微结构光学元件构成, 对这种复杂的光学系统, 目前尚无一种单一的建模技术能对其进行完整的设计和性能分析. 常用的光线追迹 (ray tracing) 方法虽然速度较快, 但对大部分微结构光学元件或系统的数值分析精度不高. 有限元方法从某种程度上可对这种光学系统进行建模, 但仿真分析时需要耗费太多的计算机资源. 一个相对比较理想的方案是: 针对光学系统的不同组件, 根据其特性选用不同的数值分析技术. 比如, 对透镜的传光特性利用几何光学的光线追迹方法, 对微结构元件采用有限元方法, 然而, 如何让这些不同的数值建模技术统一到一个工作软件平台上, 显然是一个挑战性问题. 下面要介绍的场追迹方法以及基于这种方法的 VirtualLab 软件是目前解决该问题的唯一工具 [20]. 在场追迹过程中, 它利用电磁谐波场的矢量信息进行光学系统的建模和性能分析, 在原理上拥有如下显著而独特的优势: 1) 统一化建模, 可在光学系统不同区域选用相应的矢量谐波场进行分析; 2) 光源建模的灵活性, 利用矢量谐波场的概念可灵活建立各种光源模型, 如部分相干光、部分偏振光和超短脉冲等; 3) 在系统性能分析中, 可灵活选用具有相应功能的各种探测器, 并探测光波场的所有矢量信息以及由其衍生出的各种物理参量.

下面根据文献 [20] 论述用场追迹进行光学系统建模的基本原理及其在超小自聚焦光纤探头研究中的应用方法. 图 1 是利用场追迹进行光学系统建模的示意图, 光学系统所在区域 Ω 位于三维空间 R^3 中, 即 $\Omega \subset R^3$, 它包含的 J 个子域 Ω_j 所在空间

位置 $r = (x, y, z)$ 的折射率 $n(r)$ 各不相同. 子域 Ω_j 的边界记为 Γ_j . 对一个实际的光学系统来说, 子域 Ω_j 可理解为一个光学系统的不同元件, 或者是同一个光学元件的不同组成部分. 当然, 这里所描述的光学系统不同区域的折射率也可以相同, 即为一个各向同性介质系统. 另外, 各子域 Ω_j 的形状和尺寸在一定程度上可根据所定义的建模技术自由选取或设定, 所有子域都嵌入在折射率为 n 的各向同性的绝缘或非导电介质 (如空气) 中.

光学系统建模的主要任务是求解含有电场矢量 $\mathbf{E}$ 和磁场矢量 $\mathbf{H}$ 的麦克斯韦方程组, 对任一频率 ω 的解可由一个电磁谐波场来描述, 该电磁谐波场包括三个电场分量和三个磁场分量. 因此, 光学系统建模的最基本或最主要的任务可理解为确定系统空间域 Ω 中所有电磁谐波场的各个分量信息. 当然, 对于一个实际要分析的光学系统, 也可能只需考察输入光源在其区域边界 Γ_j 上的响应信息, 或者简单地说, 所求的解是系统对预设光源电磁场矢量的一种响应. 除了光学系统的建模之外, 系统的输入-输出问题通常是光学系统分析中的重点任务. 如图 2 所示, 假设在边界 Γ_1 上输入一个光源场 V_1^{source} , 我们往往关注的是在某些边界 Γ_j ($j = 2, 3, 4, 5, 6$) 尤其是在系统输出边界 Γ_6 上所传播的电磁场信息.

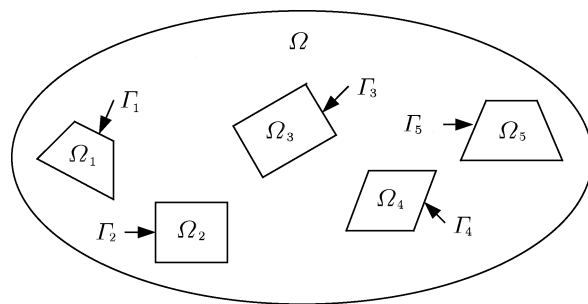


图1 J 个子域 Ω_j 所构成的光学系统模型

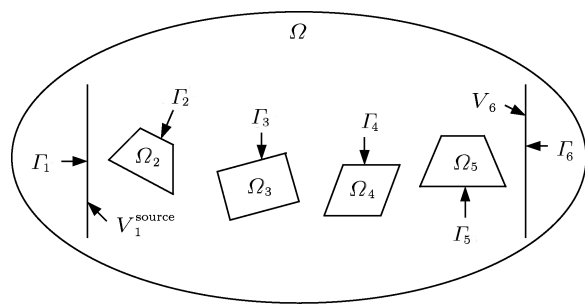


图2 光学系统的输入-输出模型

为了简化标记, 电磁谐波场的六个分量由场矢量 $\mathbf{V}$ 来表示:

$$\mathbf{V}(\mathbf{r}) = (\mathbf{E}_x(\mathbf{r}), \mathbf{E}_y(\mathbf{r}), \mathbf{E}_z(\mathbf{r}), \mathbf{H}_x(\mathbf{r}), \mathbf{H}_y(\mathbf{r}), \mathbf{H}_z(\mathbf{r}))^T, \quad (1)$$

其中, 边界 Γ_j 上的场矢量表示为

$$\mathbf{V}_j = \mathbf{V}(\mathbf{r} \in \Gamma_j). \quad (2)$$

根据麦克斯韦方程组, 场矢量 $\mathbf{V}$ 的六个分量并非相互独立, 其磁场分量可由电场分量求解, 反之亦然. 在这里用六个分量描述场矢量 $\mathbf{V}$ 的主要目的是为了强调基于场追迹的仿真技术可同时传输所有电场和磁场分量, 从而为评估场矢量特性的各种探测器的建模或定义提供尽可能大的灵活性. 比如, 坡印廷矢量 (Poynting vector) 是能量考虑方面常用的一个物理量, 其定义综合了磁场和电场信息. 当然, 在实际的光学系统建模与分析中, 也可以只提取电场信息, 这也是光学系统研究中的常用方法.

根据以上所述的光学系统的建模与标注, 下面重点描述关于系统输入与输出问题的场追迹物理方程的解析方法. 假设在子域 Ω_j 上输入一个场矢量源 $\mathbf{V}_j^{\text{in}}$, 并经算子 $\mathbf{C}_j$ 映射到场矢量输出 $\mathbf{V}_j^{\text{out}}$ 上, 其函数表达式为

$$\mathbf{V}_j^{\text{out}} = \mathbf{C}_j \mathbf{V}_j^{\text{in}}, \quad (3)$$

其中, 算子 $\mathbf{C}_j$ 表征了子域 Ω_j 自身对输入场源的响应. 子域 Ω_j 的输入场也可能受其他子域 Ω_i ($i \neq j$) 的影响, 这种影响可由算子 $\mathbf{P}_{ji}$ 来描述, 其表达式为

$$\mathbf{V}_j^{\text{in}} = \mathbf{P}_{ji} \mathbf{V}_i^{\text{out}}, \quad (4)$$

该式表示了其他所有子域 Ω_i 的输出场矢量对子域 Ω_j ($i \neq j$) 的输入场的响应. 如果系统中所有子域都存在矢量场的输入输出相互影响的问题, 那么在边界 Γ_j 上的输出场满足如下方程:

$$\mathbf{V}_j^{\text{out}} = \mathbf{V}_j^{\text{source}} + \sum_{i=1, i \neq j}^J \mathbf{C}_j \mathbf{P}_{ji} \mathbf{V}_i^{\text{out}}. \quad (5)$$

需要注意的是, 若在光学系统中建立一个光源, 至少有一个子域存在非零的光源场. 根据 (5) 式可得出关于输出场矢量 $\mathbf{V}_j^{\text{out}}$ ($j = 1, 2, \dots, J$) 的一系列方程, 因此, (5) 式可表示成矩阵的形式. 首先定义如下矢量矩阵:

$$\mathbf{V}^{\text{out}} = (\mathbf{V}_1^{\text{out}}, \mathbf{V}_2^{\text{out}}, \dots, \mathbf{V}_J^{\text{out}})^T, \quad (6)$$

$$\mathbf{V}^{\text{source}} = (\mathbf{V}_1^{\text{source}}, \mathbf{V}_2^{\text{source}}, \dots, \mathbf{V}_J^{\text{source}})^T, \quad (7)$$

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} \mathbf{C}_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{C}_2 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \mathbf{C}_J \end{pmatrix}_{J \times J}, \quad (8)$$

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} \mathbf{P}_{11} & \mathbf{P}_{12} & \dots & \mathbf{P}_{1J} \\ \mathbf{P}_{21} & \mathbf{P}_{22} & \dots & \mathbf{P}_{2J} \\ \vdots & & & \\ \mathbf{P}_{J1} & \mathbf{P}_{J2} & \dots & \mathbf{P}_{JJ} \end{pmatrix}_{J \times J}, \quad (9)$$

$$\mathbf{I} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}_{J \times J}, \quad (10)$$

其中, $\mathbf{I}$ 表示恒等算子的对角矩阵, 矩阵 $\mathbf{P}$ 的主对角线位置的元素均为 0 (即不考虑子域输出对自身的响应), 根据以上矩阵, (5) 式可改写为如下矩阵形式:

$$(\mathbf{I} - \mathbf{C}\mathbf{P})\mathbf{V}^{\text{out}} = \mathbf{V}^{\text{source}}, \quad (11)$$

或者表示为

$$\mathbf{V}^{\text{out}} = (\mathbf{I} - \mathbf{C}\mathbf{P})^{-1} \mathbf{V}^{\text{source}}, \quad (12)$$

若 $\mathbf{C}\mathbf{P}$ 的行列式小于 1, 则可得出如下级数形式的表达式 [20]:

$$\mathbf{V}^{\text{out}} = \sum_{m=0}^{\infty} (\mathbf{C}\mathbf{P})^m \mathbf{V}^{\text{source}}. \quad (13)$$

(13) 式表示了基于场追迹的光学系统建模问题求解的一般形式, 其无限级数的和在误差允许的范围内可由其部分和来近似表示, 它表示了在所有子域边界 Γ_j 上的输出场问题. 为了评估 (13) 式所示的输出场信息, 关键在于认知算子矩阵 $\mathbf{C}$ 和 $\mathbf{P}$. 对于算子矩阵 $\mathbf{C}$ 来说, 其每个单元 $\mathbf{C}_j$ 代表对应子域 Ω_j 对输入场源矢量 $\mathbf{V}_j^{\text{in}}$ 的一种响应, 并输出矢量场 $\mathbf{V}_j^{\text{out}}$. 每个子域 Ω_j 的建模技术所对应的算子 $\mathbf{C}_j$ 可任意选取并相互独立, 因此, 根据各子域 Ω_j 的具体特性, 可灵活选用基于矢量场分析的建模技术, 这也意味着 (13) 式可综合应用多种数值建模方法, 即场追迹能实现统一化的光学建模.

关于算子矩阵 $\mathbf{P}$, 可通过如下假设进行简化分析: 1) 只存在 $\mathbf{V}_1^{\text{source}}$ 一个非零光源; 2) 输入场矢量 $\mathbf{V}_j^{\text{in}}$ 只对与其相邻的子域的输出产生影响; 3) 光源通过光学系统的传播方向有序. 假设 2) 和 3) 意味着输入场矢量 $\mathbf{V}_j^{\text{in}}$ 可由输出场矢量 $\mathbf{V}_{j-1}^{\text{out}}$ ($j > 1$) 计

算得出,这也是光线追迹技术中常用的方法原理.根据假设 2) 和假设 3), (5) 式和算子矩阵 $\mathbf{P}$ 可分别简化为

$$\begin{aligned} V_1^{\text{out}} &= V_1^{\text{source}}, \quad j=1, \\ V_j^{\text{out}} &= C_j P_{j,j-1} V_{j-1}^{\text{out}}, \quad j>1; \end{aligned} \quad (14)$$

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ P_{21} & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & P_{32} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & P_{J,J-1} & 0 \end{pmatrix}_{J \times J}. \quad (15)$$

根据假设 1) 所述的只存在 V_1^{source} 一个非零光源,即 $j>1$ 时, $V_j^{\text{source}}=0$,那么 (13) 式中的矩阵 $(\mathbf{CP})^m$ 只有第一列元素存在非零数据,而且通过联立 (8) 式和 (15) 式可得如下公式:

$$\begin{aligned} &[(\mathbf{CP})^m]_{1j} \\ &= \begin{cases} 0, & j \neq m+1 \text{ 或 } m \geq J, \\ \prod_{i=2}^m C_i P_{i,i-1}, & j = m+1 \text{ 且 } m < J. \end{cases} \end{aligned} \quad (16)$$

(16) 式意味着 (13) 式是有限项和,即是一种近似表达式.为了计算 V_j^{out} ,只需考虑 $(\mathbf{CP})^m$ 的非零单元数据,联立 (13) 式和 (16) 式可得

$$V_j^{\text{out}} = \begin{cases} V_1^{\text{source}}, & j=1, \\ \left(\prod_{i=2}^j C_i P_{i,i-1} \right) V_1^{\text{source}}, & j \geq 2. \end{cases} \quad (17)$$

(17) 式描述了在简化条件下光学系统各子域 Ω_j 的场矢量输出对光源输入的响应,特别地,在光学系统的最后边界 Γ_J ($J>1$) 上的输入场矢量为

$$V_J^{\text{in}} = P_{J,J-1} \left(\prod_{i=2}^{J-1} C_i P_{i,i-1} \right) V_1^{\text{source}}. \quad (18)$$

因此, (18) 式描述了在简化条件下用场追迹原理得到的光学系统的输入-输出问题.关于这个问题的解释如下: 对一个带有光源的光学系统,从光源出发,其场源传输到下一个光学元件,光学元件对输入其中的场矢量的效应由算子矩阵 $\mathbf{C}$ 的对应算子表征,并得到一个输出矢量场,然后再传输到另一个光学元件,直到最后待评估的子域边界.这也是本文下面要描述的场追迹光学软件 VirtualLab 及其实现超小自聚焦光纤探头建模与分析的理论依据.

3 场追迹建模技术在 VirtualLab 中的实现

VirtualLab 是由德国 LightTrans 公司研发的一款物理光学分析软件,是目前市场上唯一的基于场追迹建模技术的光学系统建模与分析平台,兼容了几何光学、平面波光谱法、Fresnel 远场积分、Fourier 模式方法、ABCD 矩阵传输等多种模拟技术,对光学系统的不同媒质区域,可自动选择传输模拟技术,也可由用户根据需要自主设置传输方式.基于 (18) 式所示的系统输入-输出关系,该软件在图形化的交互接口中利用光路流程图 (light path diagram, LPD) 的表示方法进行光学系统的建模与分析,光源、元件和探测器可以在光学元件库中灵活调用并进行光学特性参数编辑.下面着重分析 VirtualLab 实现光学系统的建模和分析技术,并论述它在超小自聚焦光纤探头建模与性能分析中的应用方法.

3.1 场追迹在 VirtualLab 的实现方法

在 VirtualLab 软件平台上进行光学系统建模与分析,主要包括如下几个方面的内容: 1) 光源的建模及其在光学系统中的传输过程; 2) 光学系统中各元件的建模; 3) 光源在光学元件中传输算子的选择; 4) 评估光场参数的探测器设置.所有光源、光学元件以及探测器在光路流程图 LPD 的集成环境中进行建立与参数设置,传输过程靠基于麦克斯韦方程组的场矢量传播规律来实现.

3.1.1 电磁谐波场的描述

光场信息以光场的电磁学描述方式来表达,电磁谐波场是 VirtualLab 中最核心的概念,对于线性、各向同性的非磁性介质,它在频域中的 Maxwell 方程组的数学表达式可描述为

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E}_c(\mathbf{r}, \omega) &= i\omega\mu_0 \mathbf{H}_c(\mathbf{r}, \omega), \\ \nabla \times \mathbf{H}_c(\mathbf{r}, \omega) &= -i\omega\epsilon_0 \epsilon_r(\omega) \mathbf{E}_c(\mathbf{r}, \omega), \\ \nabla \cdot \mathbf{E}_c(\mathbf{r}, \omega) &= 0, \\ \nabla \cdot \mathbf{H}_c(\mathbf{r}, \omega) &= 0, \end{aligned} \quad (19)$$

其中, ϵ_0 为真空中的介电常数, ϵ_r 为相对介电常数, μ_0 为磁导率, ω 为谐波频率, $\mathbf{r}$ 为空间位置矢量,下标 c 表示运用了场的复数形式.电场矢量 $\mathbf{E}$ 与其复数形式的基本关系为

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = 2\text{Re}(\mathbf{E}_c(\mathbf{r}, t)), \quad (20)$$

电场矢量 $\mathbf{E}$ 的 Fourier 变换及其逆变换定义为

$$\begin{aligned}\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) &= F_{\omega}^{-1} \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) \exp(-i\omega t) d\omega, \quad (21)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) &= F_{\omega} \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \exp(i\omega t) dt. \quad (22)\end{aligned}$$

定义一个频域上的复数形式的谐波场为

$$\mathbf{E}_c(\mathbf{r}, \omega) = \mathbf{E}(\mathbf{r}) \delta(\omega - \omega_0), \quad (23)$$

其 Fourier 逆变换产生一个复数形式的电磁谐波场

$$\mathbf{E}_c(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}(\mathbf{r}) \exp(-i\omega_0 t). \quad (24)$$

显然, 谐波场的定义只有一个频率, 根据 (19) 式描述的 Maxwell 方程组, 磁场的复振幅 $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ 可由电场 $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ 推出, 其关系式为

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = -\frac{i}{\omega_0 \mu_0} \nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}). \quad (25)$$

电场复振幅的 Z -分量与另外两个分量的关系为

$$\mathbf{E}_z(\mathbf{r}) = -\int \left(\frac{\partial E_x(r)}{\partial x} + \frac{\partial E_y(r)}{\partial y} \right) dz. \quad (26)$$

在均匀介质中, 电场作用在 $Z \rightarrow \infty$ 时逐渐消失. 因此, 一个谐波场可依靠电场 x 分量和 y 分量的复振幅函数形式进行完整描述, 其算式为

$$f(r) = [E_x(r), E_y(r)]. \quad (27)$$

由此可得如下结论: 不必定义整个空间区域里的场 $f(x, y, z)$, 只需提供场在 z_j 平面的表达式即可, 对于另外的 z 坐标位置平面, 场函数遵循算子的传输规律.

$$f(x, y, z_j) = [E_x(x, y, z_j), E_y(x, y, z_j)]. \quad (28)$$

因此, 一个平面内的谐波场是根据 (28) 式中的两个分量 E_x 和 E_y 来表达和记录, E_z 分量由这两个分量计算得到. 在 VirtualLab 里, 使用 E_z 分量由 (26) 式进行运算, 磁场信息根据 (25) 式计算所得.

3.1.2 光源的建模方法

在 VirtualLab 中, 电磁谐波场由光源对话框生成, 通过定义场的空间、光谱和偏振等参数, 得到光源场在光源定义平面及其在传播过程中的解析解. 其中, 入射平面定义为初始模拟面 Z_0 , 传播过程中的电磁谐波场以采样 (sampling) 的方式表述, 其采样过程要严格控制采样尺寸, 这类似于光学中的“切趾”(apodization). 可建立单色光场、多色光场、部分空间相干光场以及超短脉冲等多种光源

模型, 每种模型都描述了一个平面上的电磁场. 由光源产生离散的电磁场, 这些电磁场由其相关参数来表征, 包括波长、物理坐标等. 为了量化处理任一谐波场 $V(x)$, $V(x)$ 用一些有限的抽样点 (n_x, n_y) 来采样; 另外, 也可根据软件中自带的光源生成器对话框, 对光源的基本参数 (basic parameters)、频谱参数 (spectral parameters)、偏振特性 (polarization)、模式选择 (mode selection) 和采样等选项进行相应的参数设置, 如波长、强度、相干性、空间位置以及采样率等.

3.1.3 光学元件的建模方法

可定义真实元件和理想元件, 理想元件主要用于功能的验证和光学系统模型的分析, 真实元件不仅能用于功能的仿真分析, 也与实际的光学元件相对应. 根据软件中光学元件 (如透镜) 的通用编辑框, 可对几何模型 (geometry)、位置/方向 (position/orientation)、结构 (structure)、传输方法 (propagation) 和容差 (tolerancing) 等选项进行相应的参数设置. 其中, 传输方法用以选择光学元件传输电磁谐波场的函数算子, 包括几何光学算子 (geometrical optics operator)、基于 ABCD 矩阵的 Collins 积分 (collins integral by ABCD matrix)、傅里叶模态法 (fourier modal method) 以及自定义传播 (customized propagation) 等. 对一个具体的光学元件, 可定义其结构尺寸、表面特征、折射率分布及空间位置等信息. 对双端面光学元件 (如自聚焦透镜) 来说, 它有两个光学界面, 可在界面之间设置折射率调制介质 (index-modulated medium) 的相关参数.

3.1.4 探测器的建模方法

基于场追迹的矢量场分析技术, 在 VirtualLab 中可建立各种探测器模型, 用于评估或分析电磁场的各种信息, 如光束功率强度、光束的光斑大小 (全宽半高)、高斯光束束腰位置, 等等.

3.2 超小自聚焦光纤探头的建模与性能分析

3.2.1 超小自聚焦光纤探头模型

作为一种超小光学探头, 自聚焦光学探头可用于深层、空间狭小生物组织或器官 (如心血管) 的活体、在线检测的小型化 OCT 系统的研究. 图 3 是一个典型的自聚焦光纤探头模型, 由普通单模光纤、无芯光纤和自聚焦光纤透镜构成. 其中, 单模光纤与 OCT 系统的探测臂相连, 把光源光束传输到无芯光纤. 无芯光纤是一种折射率均匀的特种光纤, 可通过扩束而克服单模光纤模场直径小的问题, 进而改善探头的聚焦性能. 然而, 无芯光纤的长度

应适中, 过长可能会因扩束严重而使部分光束能量从其侧壁溢出而降低耦合效率, 并降低 OCT 系统的灵敏度; 另一方面, 如果过短可能会导致扩束失败而起不到改善探头性能的目的。

自聚焦光纤透镜是探头中最关键的部分, 它因折射率的连续变化而具有自聚焦性能. 由于端面是平面, 便于和其他端面是平面的光学元件通过熔焊的方式集成在一起, 这有利于提高探头的机械强度和稳定性. 当然, 自聚焦光纤透镜的长度选择也应适中, 过长或过短都可能达不到预期的聚焦性能或增加制作工艺的难度. 因此, 自聚焦光纤透镜的长度选择是一个折衷, 借助于无芯光纤的扩束功能, 可以获得较理想的探头设计方案. 需要说明的是, 在探头设计过程中, 应使单模光纤纤芯的折射率、无芯光纤的折射率以及自聚焦光纤透镜轴线处的折射率尽可能相等, 以最大限度地减小不同光学界面对入射光束复杂的反射作用对 OCT 成像检测信号的影响, 进而在理论上获得比较高的信噪比。

3.2.2 超小自聚焦光纤探头的数值模型及性能分析

利用 VirtualLab 对超小自聚焦光纤探头进行建模的 LPD 流程图如图 4 所示, 其中, 元件 “Gaussian Wave” 代表输入高斯型光源, 元件 “NCF” 表示无芯光纤, 元件 “GRIN fiber lens” 表示自聚焦光纤透镜, 元件 “Detector” 表示光束参数探测器, 元件 “Virtual Screen” 表示虚拟光屏. 在不考虑衰减的情况下, 光束在单模光纤里的各个截面上的强度分布一致, 因此, 对单模光纤的建模, 只需设置光源 (Gaussian beam) 光束的束腰直径与单模光纤纤芯尺寸一致, 并直接输入到无芯光纤中. 在 VirtualLab 环境里用鼠标双击任一元件可弹出相应的参数或特性编辑窗口, 根据需要灵活改变相关参数. 光束参数探测器 (Detector) 用来检测高斯光束通过自聚焦透镜后的束腰大小, 虚拟光屏 (Virtual Screen) 观测光束通过探针后的光强分布。

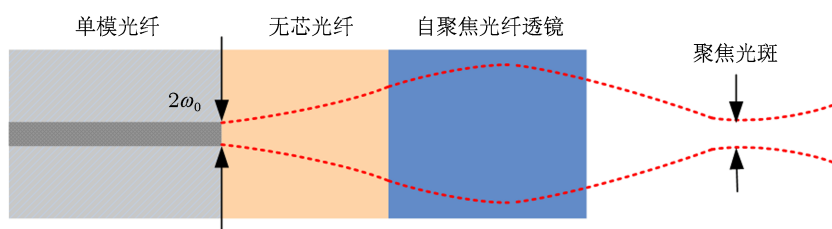


图3 自聚焦光纤探头模型

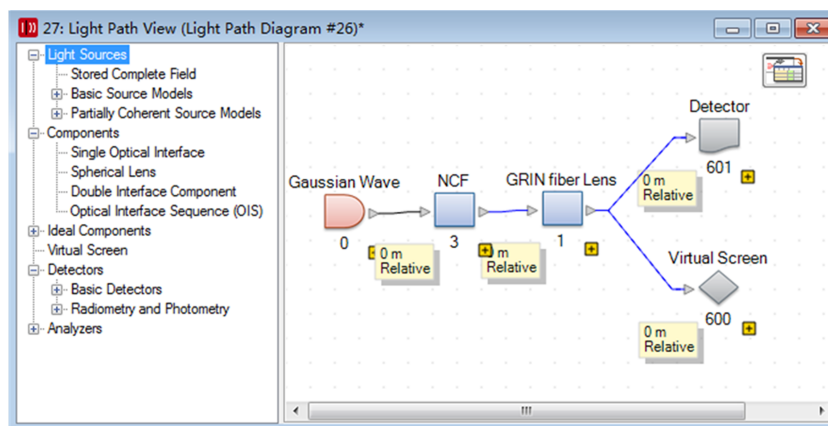


图4 超小自聚焦光纤探头建模与分析光路流程图

自聚焦光纤透镜的编辑窗口如图 5 所示, 其长度和孔径在 Structure 中的 Physical Extension 和 Definition Area 编辑框中进行设置 (图 5(a)), 长度设为 $100\text{ }\mu\text{m}$, 孔径设为 $125\text{ }\mu\text{m} \times 125\text{ }\mu\text{m}$, 端面特性通过鼠标单击 First interface, Second interface 进行编辑, 材料特性通过单击 Medium between interfaces 的 Edit 选项进行编辑 (图 5(b)), 设置自聚焦光纤透镜的折射率梯度变化常数 g 为 5.5 mm^{-1} , 中心轴线处的折射率 n_0 为 1.486. 传输方式 (Propagation) 选为自动设置 (Automatic Selection Operator), 由软件自动选择并进行光束传播计算.

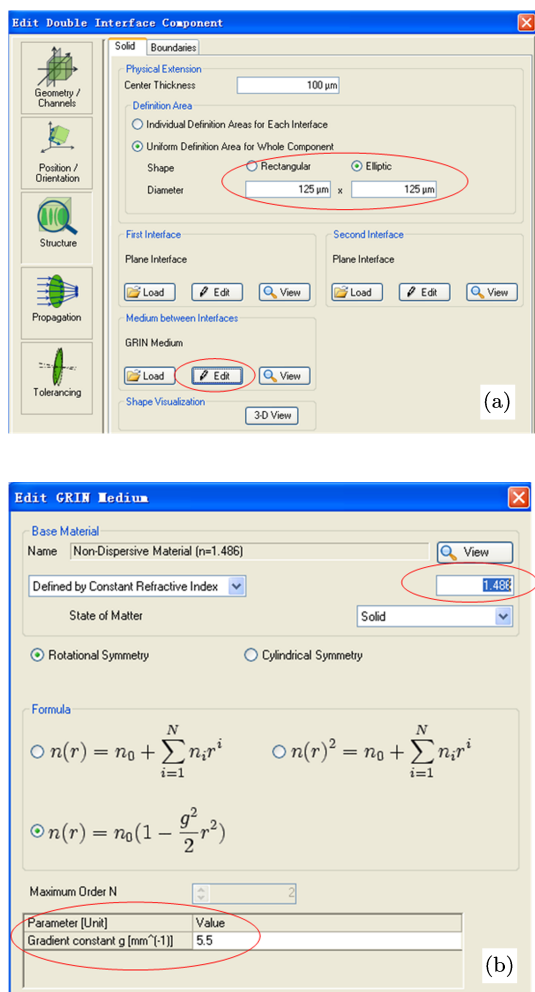


图 5 自聚焦光纤透镜编辑窗口 (a) 基本参数编辑窗口; (b) 折射率设置窗口

参数设置完成后运行程序并进行光束性能检测, 如图 6 所示是高斯光束通过超小自聚焦光纤探头后在输出端面上的高斯光斑及其强度分布, 从该图可以看出光束强度的高斯型分布特征, 归一化峰值强度 (0.16) 在光斑的中心位置, 由光束参数探测器检测的光斑半径约为 $25.4\text{ }\mu\text{m}$.

根据图 3 和图 4 所示的超小自聚焦光纤探头模型及性能检测的光路流程图, 设置自聚焦光纤透镜的长度为 $110\text{ }\mu\text{m}$, 用光束参数探测器记录了高斯光束通过探头后从输出面至 1.2 mm 远处的光束半径大小, 如图 7 所示, 横坐标表示高斯光束通过镜头后的传播位置, 纵坐标表示束腰半径. 不难看出, 光束通过超小自聚焦光纤探头后先聚焦至某一位置, 然后进行发散, 即束腰半径先减小再增大. 根据图 7, 聚焦位置为 0.63 mm , 对应的束腰半径为 $11.9\text{ }\mu\text{m}$. 为便于与实验结果对比, 这里的焦距也不妨定义为探头的工作距离 (working distance), 束腰直径定义为光斑尺寸 (spot size). 采用同样的方法, 设自聚焦光纤透镜的长度分别为 0.10 mm 和 0.12 mm 时, 求得的焦距分别为 0.75 mm 和 0.51 mm , 束腰直径分别为 $32\text{ }\mu\text{m}$ 和 $19\text{ }\mu\text{m}$.

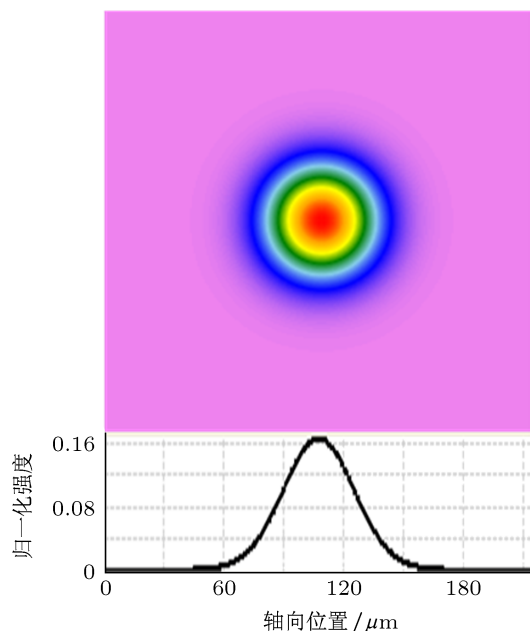


图 6 高斯光束通过 GRIN 透镜后的光斑及强度分布

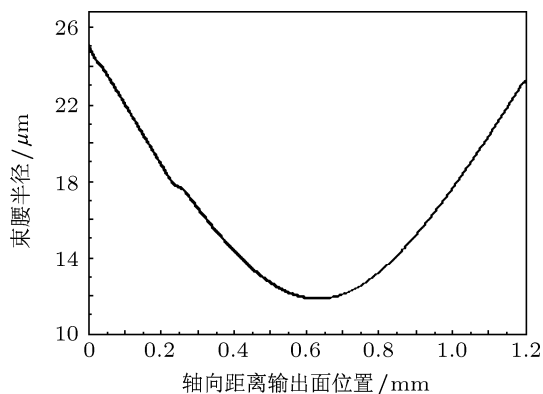


图 7 高斯光束通过自聚焦光纤探头后的传播性能

4 场追迹仿真结果的验证

本文研究的自聚焦光纤探头是由“单模光纤 + 无芯光纤 + 自聚焦光纤镜头”三种不同尺寸的光纤组件构成的总长不超过 1 mm 量级的超小 OCT 探头,其中无芯光纤和自聚焦光纤镜头的尺寸均在亚毫米量级,其工作距离一般不超过 1 mm,聚焦光斑尺寸一般不超过 40 μm . 对这种几何尺寸超小的探头模型的实验验证是一个困难的问题. 全光纤型超小自聚焦光纤探头的制作装置,包括光纤熔接机、光纤超声切割机和体视显微镜等. 在制作自聚焦光纤探头时,其组件分别选用康宁 (Corning) 公司的普通单模光纤 SMF-28 以及台湾卓越光纤有限公司 (Prime Optical Fiber Corporation, Taiwan) 的无芯光纤 NCF125 和 GRIN 多模光纤 (50/125 Multimode Fiber).

采用日本古河电器工业株式会社制造商生产的型号为 S117A 的 Fusion Splicer 熔接机进行不同光纤组件的焊接. 由于 Fusion Splicer S117A 熔接机的焊接质量很高,留下的焊点不明显,这一方面从结构上减小了光束通过焊接位置因发生反射对 OCT 系统检测灵敏度的影响,另一方面也为探针组件预计长度的高精度切割带来了困难. 为此,本文设计基于体视显微镜和超声切割机的高精度光纤长度切割系统. 使 Fiber Cleaver FK II-4 切割机 (美国 PK Technology 制造商生产) 放于体视显微镜 XTL-2400 的工作台上. 光纤切割过程如下: 首先,把待切割的光纤 (由两种光纤焊接而成,如单模光纤和无芯光纤) 放置于超声切割机的光纤槽上,使焊点所处的大概位置对准超声切割机的刀口; 其次,调整显微镜的放大倍数和视场范围,从带有尺度刻线的分划目镜中观测到焊点和超声切割机刀口; 第三,移动光纤位置,使焊点相距刀口预计长度处; 最后,启动超声切割机开关,发出高强度超声能量脉

冲,完成光纤长度的切割.

由于自聚焦光纤探头的尺寸很小,尽管 Fiber Cleaver FK II-4 超声切割机的切割精度以及 Fusion Splicer S117A 熔接机的焊接精度都很高,但在切割之前光纤放置的位置相对刀口的倾斜角度等因素会对预切割长度造成切割误差. 为此,本文采用更高精度的测量设备对其几何尺寸进行精确测量. 图 8 是根据本文设计的光纤长度切割与焊接系统制作的一个自聚焦光纤探头在奥林巴斯工业激光共焦显微镜 OLS4000 中的图像,其中对焊点部位进行了放大显示.

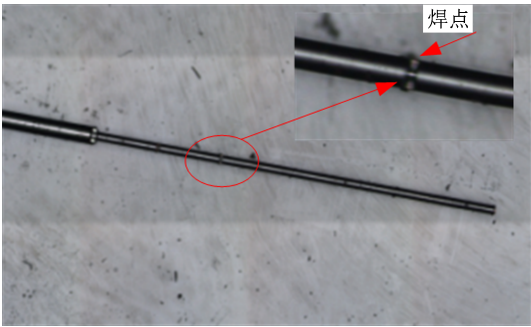


图 8 自聚焦光纤探头及其焊点

为了检测超小自聚焦光纤探头的聚集性能,可构建由一个带有红外 CCD 的光束轮廓仪、一个超流明二极管光源、一个显微物镜以及计算机等构成的检测系统. 光源光束通过超小自聚焦光纤探头后,由显微物镜进行光束放大,再通过光束轮廓仪检测沿传播方向在不同位置处的光强分布,最后传输到计算机里进行处理. 有关光纤探头性能检测的详细实验方案可参考文献 [15—18], 下面主要对已发表的实验结果和本文数值分析的结果进行对比分析. 表 1 显示了由 VirtualLab 仿真得到的探头聚焦性能参数与文献 [15—18] 提供的实验数据的比

表 1 仿真结果与实验数据对比

	序号	无芯光纤长度/mm	自聚焦光纤透镜长度/mm	工作距离/mm	光斑尺寸/ μm
仿真结果	1	0.36	0.10	0.75	32
	2	0.36	0.11	0.63	24
	3	0.36	0.12	0.51	19
实验结果	1	0.36	0.10	0.65	31
	2	0.36	0.11	0.60	28
	3	0.36	0.12	0.50	23

较情况. 从该表可以看出, 仿真结果与实验数据几乎相同, 因此, 表明了仿真数据的可靠性, 进而说明了基于 VirtualLab 进行超小自聚焦光纤探头建模与性能分析的可行性. 至于仿真结果与实验结果的差别, 可能由如下原因所致. 首先, 无芯光纤和自聚焦光纤透镜的长度不可能精确到预设长度 (如 0.36 mm 和 0.1 mm), 这会导致无芯光纤的扩束以及自聚焦光纤透镜的聚集性能产生误差; 其次, 超小自聚焦光纤探头各组件的折射率不可能与理论计算所用的设定值完全相同, 不同交界面对光束的反射作用会产生测量误差, 而仿真设置中没有考虑这些误差影响; 第三, 光束检测系统本身存在测量误差.

5 结 论

超小光学探头是 OCT 系统小型化研究的一个重要内容, 自聚焦光纤探头是一种全光纤型的超小探头, 在人体深层、狭小组织 (如心血管) 的成像检测方面具有潜在的应用价值. 本文基于计算机技

术和光学建模数值仿真技术的最新研究成果, 把场追迹的光学建模分析方法引入到自聚焦光纤探头的设计与分析领域, 通过对场追迹基本原理及其在 VirtualLab 软件中的实现方法的论述, 并通过对仿真结果与实验结果的比较分析, 可得出如下结论:

1. 自聚焦光纤探头可通过增加一种无芯光纤隔片来改善其聚焦性能;
2. 基于场追迹的光学数值模拟技术可用于超小自聚焦光纤探头的建模与性能分析;
3. VirtualLab 是自聚焦光纤探头设计的一个有效而灵活的工具, 为超小光学探头的优化设计及其在 OCT 系统中的应用提供了一种理论基础和技术手段, 也为其它光学系统的场追迹建模与分析提供了一种方法借鉴.

感谢讯技光电科技 (上海) 有限公司提供的 VirtualLab 软件密钥及其技术团队提供的软件操作技术支持. 感谢加拿大国家研究院 (National Research Council Canada) 毛幼馨 (Youxin Mao) 博士发表的实验检测数据.

- [1] Huang D, Swanson E A, Lin C P, Schuman J S, Stinson W G, Chang W, Hee M R, Flotte T, Gregory K, Puliafito C A 1991 *Science* **254** 1178
- [2] Guo S G, Yu L F, Sepehr A, Perez J, Su J P, Ridgway J M, Vokes D, Wong B J F, Chen Z P 2009 *J. Biom. Opt.* **14** 014017
- [3] Xie T Q, Guo S G, Chen Z P, Mukai D, Brenner M 2006 *Opt. Expr.* **14** 3238
- [4] Xie T Q, Liu G J, Kreuter K, Mahon S, Colt H, Mukai D, Peavy G M, Chen Z P, Brenner M 2009 *J. Biom. Opt.* **14** 064045
- [5] Singh J, Teo J H S, Xu Y, Premachandran C S, Chen N, Kotlanka R, Olivo M, Sheppard C J R 2008 *J. Micromech. Microeng.* **18** 025001
- [6] Aljaseem K, Werber A, Seifert A, Zappe H 2008 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **10** 044012
- [7] Meemon P, Lee K S, Murali S, Rolland J 2008 *Appl. Opt.* **47** 2452
- [8] Min E J, Na J, Ryu S Y, Lee B H 2009 *Opt. Lett.* **34** 1897
- [9] Jung W, Benalcazar W, Ahmad A, Sharma U Tu H H, Boppart S A 2010 *J. Biom. Opt.* **15** 066027
- [10] Hudelist F, Nowosielski J M, Buczynski R, Waddie A J, Taghizadeh M R 2010 *Opt. Lett.* **35** 130
- [11] Hudelist F, Buczynski R, Waddie A J, Taghizadeh M R 2009 *Opt. Expr.* **17** 3255
- [12] Swanson E, Petersen C L, McNamara E, Petersen C L, McNamara E, Lamport R B, Kelly D L 2002 *U.S. Patent* 6 445 939 [1999-08-09]
- [13] Reed W A, Yan M F, Schnitzer M J 2002 *Opt. Lett.* **27** 1794
- [14] Jafri M S, Farhang S, Tang R S, Desai N, Fishman P S, Rohwer R G, Tang C M, Schmitt J M 2005 *J. Biom. Opt.* **10** 051603
- [15] Mao Y X, Chang S D, Sherif S, Fluerau C 2007 *Appl. Opt.* **46** 5887
- [16] Mao Y X, Chang S D, Fluerau C 2010 *J. Biomedical Science and Engineering*, **3** 7
- [17] Wang C, Mao Y X, Fang C, Tang Z, Yu Y J, Qi B 2011 *Opt. Eng.* **50** 094202
- [18] Wang C, Mao Y X, Tang Z, Fang C, Yu Y J, Qi B 2011 *Chin. Phys. B* **20** 114218
- [19] Wang C, Mao Y X, Tang Z, Fang C, Yu Y J, Qi B 2011 *Opt. Prec. Eng.* **19** 2300
- [20] Wyrowski F, Kuhn M 2011 *J. Modern Opt.* **58** 449

Field-tracing based numerical simulation technique for the investigation of ultra-small self-focusing optical fiber probe*

Wang Chi^{1)2)†} Bi Shu-Bo¹⁾ Wang Li³⁾ Xia Xue-Qin¹⁾ Ding Wei¹⁾ Yu Ying-Jie¹⁾

1) (*Dept. of Precision Mechanical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China*)

2) (*State key laboratory of precision measuring technology and instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

3) (*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS, Shanghai 201800, China*)

(Received 21 May 2012; revised manuscript received 13 July 2012)

Abstract

Field-tracing based numerical simulation technique is investigated to design and analyze ultra-small self-focusing optical fiber probe. Firstly, the concept and principle of the field-tracing are described. Secondly, the method is discussed to implement the field-tracing technique in the physical optical software of VirtualLab. Finally, an ultra-small self-focusing optical fiber probe is simulated in the field-tracing based optical software of VirtualLab. In this paper, we find that under the conditions of a fiber spacer length of 0.36 mm and the self-focusing fiber lens lengths of 0.1 mm, 0.11 mm and 0.12 mm, the working distances of the probe are 0.75 mm, 0.63 mm and 0.51 mm, and the focus spot sizes are 32 μm , 24 μm and 19 μm respectively. The simulation results are in good agreement with the experimental data, showing that the field-tracing based numerical simulation technique is an effective tool for investigating ultra-small self-focusing optical fiber probe.

Keywords: field tracing, optical probe, numerical simulation technique, optical coherence tomography (OCT)

PACS: 42.81.Ht, 42.15.Eq, 02.60.Cb, 42.60.Jf

DOI: 10.7498/aps.62.024217

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41104065), the State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, the Dawn Planning Foundation of Shanghai Municipal Education Commission (Grant No. 12CG047), and the Scientific Research Innovation Project of Shanghai Municipal Education Commission (Grant No. 13YZ022).

† Corresponding author. E-mail: wangchi@shu.edu.cn