

低损微结构空芯光纤的数值仿真研究

吴达坤^{1,2}, 于飞¹, 王亚洲^{1,2}, 廖梅松¹

1. 强激光材料重点实验室, 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海

2. 材料与光电研究中心, 中国科学院大学, 北京

简介: 低损微结构空芯光纤在光通信、传感、微加工以及气体非线性研究等领域具有极大潜力。其中, 反谐振空芯光纤 (AR-HCF) 因其简单的结构设计及低损宽带传输的特点而备受关注。图1是典型的AR-HCF结构, 我们以其为原型研究此类具有大芯径-波长比和稀疏精细结构微结构空芯光纤的网格划分策略, 以期在尽量减少计算资源的情况下保证损耗结果的准确性, 并基于此进一步研究该光纤的结构参数对其损耗特性的影响。

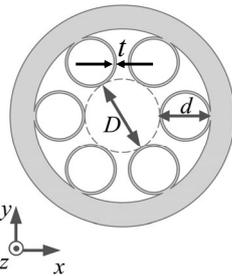


图 1. 典型的AR-HCF结构

计算方法: 通过有限元法模拟反谐振空芯光纤的损耗特性。这里采用COMSOL波动光学模块中的“电磁波, 频域”物理场接口, 求解的物构方程如下:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) - k_0^2 \epsilon_r \vec{E} = 0$$

依图1构建几何模型并外加完美匹配层(PML) 为边界条件。设定主体材料为石英, 光纤芯径 D 为 $120 \mu\text{m}$, 毛细管外径 d 为 $72 \mu\text{m}$, 壁厚 t 为 $1.04 \mu\text{m}$, 波长 λ_0 为 $4 \mu\text{m}$ 。石英和空气区域以三角网格划分, PML域以映射网格划分(图2), 定义

$$\left\{ \begin{array}{l} q_a = \frac{\lambda_0}{n_a \overline{m}_a} \\ q_s = \frac{\lambda_0}{n_s \overline{m}_s} \\ q_p = \frac{\lambda_{\perp}}{\overline{m}_p} = \frac{\lambda_0}{\overline{m}_p \sqrt{n_s^2 - n_{eff}^2}} \end{array} \right.$$

其中 n_a 、 n_s 分别为空气和石英在 λ_0 处的折射率, λ_{\perp} 为横向波长, n_{eff} 为模式有效折射率(此处采用M-S模型结果作为先验值代入[1])。 \overline{m}_a 、 \overline{m}_s 和 \overline{m}_p 分别为空气、石英、PML域的最大单元尺寸。另设PML层厚为 $m\lambda_{\perp}$ (m 为整数)。则PML层厚及网格大小可通过变化参数(m , q_p , q_s , q_a)控制。这里对四个参数进行所有组合扫描, 观察损耗计算结果并以相对于均值的偏差进行呈现。

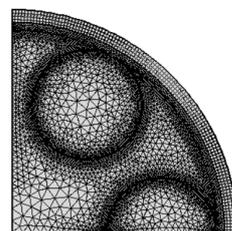


图 2. 各区域网格划分示意图

结果: 按照我们的网格划分设定, 通过对空气、石英和PML区域的网格进行不同程度的划分来研究网格疏密对损耗结果收敛性的影响, 结果如下图。发现计算结果仅对石英区网格划分敏感, 当网格最大单元尺寸被限制在 $1/4$ 的石英中波长以下时, 结果收敛。类似结论在模式折射率的收敛性验证中同样存在。

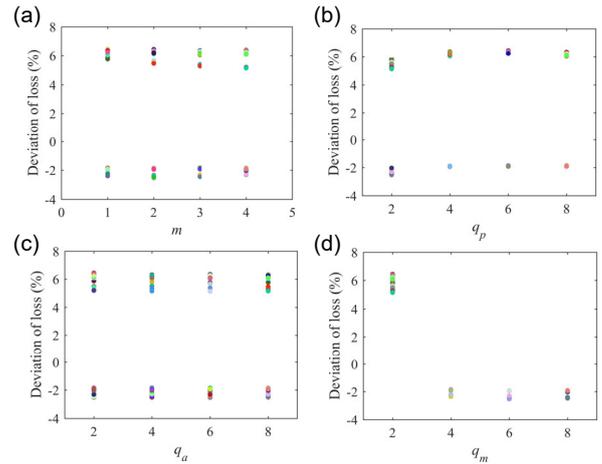


图 3. PML层厚及各区域网格划分对于损耗结果收敛性的影响

基于前面收敛性验证结果, 对反谐振空芯光纤进行进一步研究。通过改变光纤结构参数 (芯径定为 $120 \mu\text{m}$) 并计算光纤损耗, 结果如图4, 发现此类光纤的限制损耗对于芯壁厚度和包层空气孔尺寸都非常敏感, 而材料损耗的变化则主要取决于芯壁厚度。图中圈出了反谐振空芯光纤的低损区域, 为制备低损光纤的结构设计提供参考。

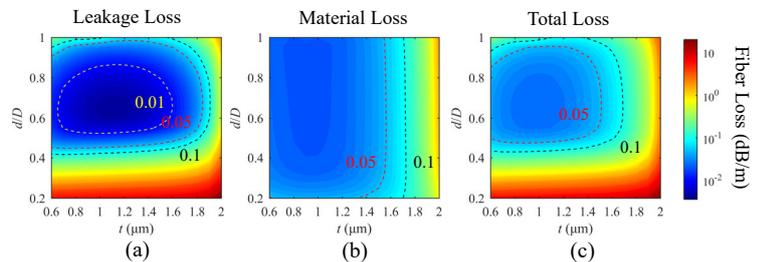


图 4. AR-HCF包层结构参数对损耗的影响

结论: 仿真表明损耗及模式折射率计算结果的收敛性敏感于石英区域的网格划分, 由此可在保证计算结果稳定收敛的情况尽可能减少计算资源占用; 另外研究了反谐振空芯光纤的结构参数对于损耗的调控作用, 为设计低损光纤提供参考。

参考文献:

1. E. A. J. Marcattili and R. A. Schmelzter, Hollow Metallic and Dielectric Waveguides for Long Distance Optical Transmission and Lasers, Bell System Technical Journal, 43, 1783-1809 (1964)