

双包层稀土掺杂光纤抽运吸收特性的分析*

延凤平^{1)2)†} 刘鹏³⁾ 陶沛琳¹⁾ 李琦¹⁾ 彭万敬¹⁾ 冯亭¹⁾ 谭思宇¹⁾

1) (北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

2) (全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

3) (邢台学院物理系, 邢台 054001)

(2011年12月6日收到; 2012年1月20日收到修改稿)

建立了复折射率纤芯结合有限差分束传播法的双包层稀土掺杂光纤抽运吸收效率数值模型, 利用该模型对几种常用内包层外边界结构下双包层稀土掺杂光纤的抽运吸收系数进行了详细的分析, 得出相应双包层光纤的抽运吸收特性. 分析结果对双包层稀土掺杂光纤的优化设计具有重要的指导意义.

关键词: 双包层稀土掺杂光纤, 高斯光束, 吸收效率, 抽运

PACS: 42.25.Bs, 42.60.Pk, 42.81.Bm

1 引言

由于受激散射效应的影响, 激光在石英介质中传输时, 其单位面积上最大可通过的功率存在极限值. 因此对于纤芯抽运的光纤激光器或光纤放大器, 其所能承受的抽运光功率是有限的. 为了改进激光器的结构, 进一步改善激光器的性能, 实现光纤激光器与光纤放大器的高品质大功率激光输出, 包层抽运技术是行之有效的方法^[1-8]. 其中, 稀土离子对抽运光的吸收效率是至关重要的因素^[9,10]. 为了准确分析稀土离子对抽运光的吸收效率, 人们相继提出了一些计算模型, 如近似镜像法 (approximate images method, AISM)^[11], 射线追踪法 (ray tracing method, RTM)^[12]、波混沌法 (wave chaos method, WCM)^[13]、束传播法 (beam propagation method, BPM)^[14]、模式分析法 (modal analysis method, MAM)^[15]. 其中基于几何光学理论的 RTM 法虽然在计算精确度上存在一定的不足, 但由于其概念直观、分析简单且易于实现, 因此常被用于抽运吸收效率的初步分析. 基于波动光学理论的 BPM 法虽能给出比较准确的结果, 但由于其理论复杂且

实现起来难度较大, 因此较少使用. 文献 [4] 中虽使用了该法, 但在分析过程中忽略了诸多因素, 因此结论不太准确.

在一般情况下, 导波分析中均不考虑光场的损耗与放大, 因此波导材料的折射率分布均取实数. 若波导本身为衰减或增益型器件, 例如稀土掺杂光纤, 则波导的传输特性就会发生改变, 此时必须重新考虑波导材料的折射率设置. 通常, 为计算具有衰减或增益的光纤中场的传输特性, 需要求解具有复折射率剖面光纤的复本征值方程, 从而得到光纤的吸收系数或增益系数. 在波动光学中, 可以通过求波动方程解析解的方式来直接完成这一过程. 但是通常求解复本征值方程解析解的过程比较复杂, 而相对应的实折射率情况下光纤的导波特性和研究得比较透彻, 因此研究者们提出了一系列近似方法. 文献 [16] 中, Sader 提出了一种用于复折射率光纤的分析方法, 该法使用的前提是假定折射率虚部为小量时求得的模场与真实模场相差甚微, 通过求解相关实折射率剖面的标量波动方程得到复传播常数, 计算稍显繁琐. 文献 [17] 中, 赵楚军等利用 Davidenko 方法对复折射率光纤的传输特性进行了分析. 文献 [18] 中, Liu 等提出利用微扰分析求解

* 国家自然科学基金 (批准号: 60877042, 61077069)、河北省高等学校科学技术研究指导项目 (批准号: Z2011201) 和邢台市科学技术与发展计划任务 (批准号: 2011ZZ052-4) 资助的课题.

† E-mail: fpyan@bjtu.edu.cn

复折射率光纤传输特性的方案, 该法适用性强, 并且简洁明了. 上述三种方法从不同侧面分析了复折射率光纤问题, 并就复折射率下光纤吸收或增益系数的求解给出了近似结果. 如何寻找一种准确而简便的分析方法, 对于包层抽运光纤的设计及其性能的分析来说尤为重要.

本文建立了复折射率纤芯结合有限差分的双包层稀土掺杂光纤抽运吸收效率数值模型, 利用该模型对几种常用的内包层外边界结构下的抽运吸收效率进行了详细的分析. 由此得出相应双包层稀土掺杂光纤的抽运吸收特性, 从而为双包层光纤的优化设计提供了理论指导.

2 基于复折射率纤芯分析的掺杂光纤传输模型

设光纤纤芯半径为 a , 纤芯折射率为 n_1 , 包层折射率为 n_2 . 考虑光纤无损耗或增益时, 纤芯、包层折射率均为实数. 通过求解满足一定条件的本征值方程便可得到光纤各模式的传输常数 β , 进而得到模式的等效折射率 $n_{\text{eff}} = \beta/k_0$, k_0 为真空中的波数. β , n_{eff} 均为实数, 频域下光纤中的场可表示为 $\Psi(r, \varphi, z) = \phi(r, \varphi) \exp(-i\beta z)$ (Ψ 为 \mathbf{E} 或 \mathbf{H}). 对于掺杂光纤而言, 由于本征吸收与自发辐射、受激辐射等现象的存在, 光在传输中将出现不同程度的损耗或增益, 因此 β 成为复数, 其虚部为正表示增益, 虚部为负表示损耗. 此时相应的纤芯折射率可表示为 $n_1 = n'_1 + in''_1$, 等效折射率可表示为 $n_{\text{eff}} = n'_{\text{eff}} + in''_{\text{eff}}$.

为求 $n_1 = n'_1 + in''_1$ 时的等效折射率, 可在复平面内于 $n_{\text{eff}} = n'_{\text{eff}}$ 点将其做 Taylor 展开:

$$n_{\text{eff}}(n'_1 + in''_1) = n_{\text{eff}}(n'_1) + \frac{(in''_1)^1}{1!} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial n_1} \Big|_{n_1=n'_1} + \frac{(in''_1)^2}{2!} \frac{\partial^2 n_{\text{eff}}}{\partial n_1^2} \Big|_{n_1=n'_1} + \dots \quad (1)$$

取一阶近似, 并考虑到 $\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial n_1} \Big|_{n_1=n'_1} = \frac{\partial n'_{\text{eff}}}{\partial n'_1}$, 可将上式简化为

$$n_{\text{eff}}(n'_1 + in''_1) = n_{\text{eff}}(n'_1) + in''_1 \frac{\partial n'_{\text{eff}}}{\partial n'_1}. \quad (2)$$

由此可见, 在一阶近似下, 对于复折射率剖面的光纤而言, 所求得的相应复等效折射率的实部 n'_{eff} 即

为 $n_1 = n'_1$ 时的等效折射率. 此时虚部为

$$n''_{\text{eff}} = n'_1 \frac{\partial n'_{\text{eff}}}{\partial n'_1}, \quad (3)$$

即 n''_{eff} 可从实本征值方程下等效折射率 n'_{eff} 随光纤折射率 n'_1 的变化关系中得出.

在标量近似下, 对于阶跃折射率分布单模掺杂光纤的基模, 存在如下关系:

$$g(n_{\text{eff}}) = \frac{UJ_1(U)}{J_0(U)} - \frac{WK_1(W)}{K_0(W)} = 0, \quad (4)$$

其中, $U = ak_0 \sqrt{n_1'^2 - n_{\text{eff}}'^2}$, $W = ak_0 \sqrt{n_{\text{eff}}'^2 - n_2^2}$.

利用 J 函数与 K 函数的递推特性, 经运算可得 n'_{eff} 随 n'_1 的变化关系为

$$\frac{dn'_{\text{eff}}}{dn'_1} = \frac{n'_1}{n'_{\text{eff}}} \left[\frac{\left(\frac{J_1}{J_0}\right)^2 + 1}{\left(\frac{J_1}{J_0}\right)^2 + \left(\frac{K_1}{K_0}\right)^2} \right]. \quad (5)$$

将 (5) 式代入 (3) 式, 可得

$$n''_{\text{eff}} = \frac{n'_1 n''_1}{n'_{\text{eff}}} \left[\frac{\left(\frac{J_1}{J_0}\right)^2 + 1}{\left(\frac{J_1}{J_0}\right)^2 + \left(\frac{K_1}{K_0}\right)^2} \right]. \quad (6)$$

因此有

$$\beta = k_0 n_{\text{eff}} = k_0 n'_{\text{eff}} + ik_0 n''_{\text{eff}}. \quad (7)$$

对于线偏振模, 沿 z 向的功率流密度为

$$S_z = \frac{1}{2} n'_1 \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} |\Psi|^2, \quad (8)$$

因此有

$$S_z = \frac{1}{2} n'_1 \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} |\phi(r, \varphi) e^{-i\beta z}|^2 = \frac{1}{2} n'_1 \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} |\phi(r, \varphi)|^2 e^{2k_0 n''_{\text{eff}} z}, \quad (9)$$

可得光纤的吸收系数为

$$\alpha = -10 \lg \left[\frac{S_z(z + \Delta z)}{S_z(z)} \right] / \Delta z = -20k_0 n''_{\text{eff}} \lg e, \quad (10)$$

选取与文献 [15] 中相同的参数: $a = 2.2 \mu\text{m}$, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $n'_1 = 1.475$, $n_2 = 1.458$. 分别在纤芯折射率虚部 n''_1 取不同值的情况下, 利用上述方法求解光纤的吸收系数 α , 结果如表 1 所示.

表 1 基于微扰法计算的掺杂光纤吸收系数

n''_1	-10^{-3}	-10^{-4}	-10^{-5}	-10^{-6}	-10^{-7}
$\alpha/\text{dB}\cdot\text{m}^{-1}$	-26187	-2618.7	-261.87	-26.187	-2.6187

根据表 1 中纤芯折射率虚部 n_1'' 的取值, 设 $Z = 0$ 处的光为纤芯基模光束, 功率为 0 dBm, 传输距离为 10000 μm . 利用有限差分的 BPM 法进行光场传输模拟, 得到光场功率随传输距离的变化关系如图 1 所示.

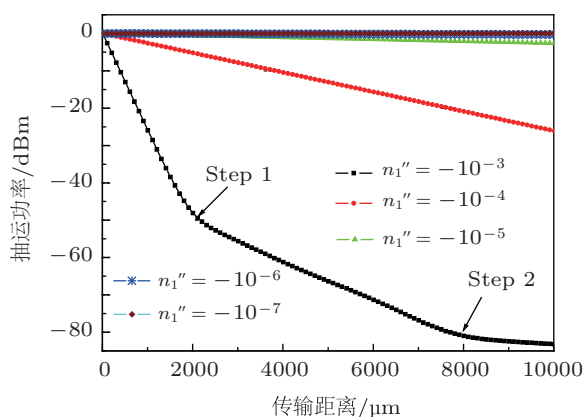


图 1 基于 BPM 的复折射率光纤中光场功率随传输距离变化关系

由图 1 可知, 在五种 n_1'' 取值情况下, 光纤中的传输光功率均随着传输距离的增长而逐步降低, 表明纤芯虚部负折射率的选取等同于引入吸收, 而且虚部绝对值越小, 功率降低的速度越慢.

对比图 1 中的 5 条曲线, 对于虚部绝对值较小的情况, 光功率随传输距离的变化近似为线性变化. 当 $n_1'' = -10^{-3}$ 时, 虚部绝对值较大, 此时光功率随传输距离的变化出现了两个明显的跃变点, 由此整体吸收过程被分为三个部分. 在每一部分内部, 光功率随传输距离的变化又呈现线性变化趋势. 利用图 1 中的模拟结果计算出五种 n_1'' 取值情况下对应的光纤吸收系数, 结果如表 2 所示. 对于 $n_1'' = -10^{-3}$ 的情况, 分别给出了三个不同区段内的吸收系数.

表 2 基于 BPM 的掺杂光纤吸收系数

n_1''	-10^{-3}	-10^{-4}	-10^{-5}	-10^{-6}	-10^{-7}
	-23537	-2610.01	-261.02	-26.12	-2.63
$\alpha/\text{dB}\cdot\text{m}^{-1}$	-5454.5	—	—	—	—
	-1286.4	—	—	—	—

比较表 2 与表 1, 可以看出, 当纤芯折射率虚部的绝对值 n_1'' 较小时, 通过 BPM 计算的掺杂光纤吸收系数与微扰法计算的结果基本相同. 当 $n_1'' = -10^{-3}$ 时, 在传输距离小于 2000 μm 的情况下, 通过 BPM 计算的掺杂光纤吸收系数与微扰法计算的结果出现了较大差别, 但还比较接近. 在

传输距离超过 2000 μm 后, 两种方法计算结果的差别迅速增大. 这是由于微扰法建立在纤芯折射率虚部的“小量近似”基础上, 只有当虚部绝对值很小时才能使用该方案, 较大的情况已不适用.

3 包层抽运光纤抽运吸收效率的分析

利用上述模型对圆形内包层、D 形内包层、渐变折射率内包层等三类具有代表性的包层抽运光纤的抽运吸收效率进行研究. 首先分析在内包层形状与折射率分布确定的情况下抽运光注入条件、纤芯大小、破缺程度等因素对抽运吸收的影响; 其次分析在相同入射条件下具有不同内包层形状与折射率分布的包层抽运光纤的抽运吸收特性.

3.1 抽运光与掺杂纤芯大小对圆形内包层的包层抽运光纤抽运吸收特性的影响

设抽运光波长为 980 nm, 内包层折射率 $n_{\text{incl}} = 1.45067$ (纯石英材料), 外包层折射率 $n_{\text{outcl}} = 1.3758$ (低折射率树脂材料), 纤芯吸收系数 $\alpha = 300 \text{ dB/m}$, 对应纤芯折射率 $n_{\text{core}} = 1.4542 - i(6.20551 \times 10^{-6})$, 纤芯数值孔径 $\text{NA}_{\text{core}} = 0.1$, 内包层数值孔径 $\text{NA}_{\text{incl}} = 0.46$, 纤芯半径 $a_{\text{core}} = 6 \mu\text{m}$, 内包层半径为 62.5 μm . 当入射抽运光的光斑半径由 6 μm 逐渐增大到 60 μm 时, 可以分别得到相应剩余抽运光功率与抽运吸收效率随注入光斑大小的变化曲线, 如图 2 和图 3 所示.

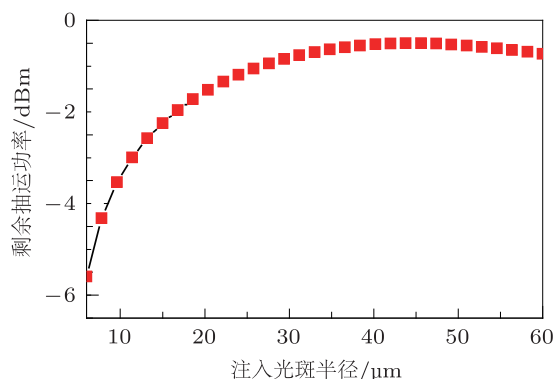


图 2 传播距离为 2 m 时剩余抽运功率随注入光斑尺寸的变化

为方便比较, 上述计算中统一设定传播距离为 2 m, 入射抽运光用圆高斯光束表示. 由图 3 可知, 当注入抽运光束的尺寸较小时, 吸收效率较高, 对应半径 6 μm 的入射抽运光束, 吸收效率超过了 70%. 当注入的抽运光束逐渐增大时, 吸收效率

逐步下降, 在入射抽运光半径为 $45 \mu\text{m}$ 时, 吸收效率达到最小, 仅有 10% 左右. 计算结果与理论分析相符. 较小的入射光束半径代表少模、低阶模, 反映在几何光学上对应子午光线或焦散面较小的螺旋光类型, 其与掺杂纤芯的重叠积分较大, 因此吸收效率较高; 较大的入射半径代表多模、高阶模, 反映在几何光学上对应焦散面较大的螺旋光类型, 其与掺杂纤芯的重叠积分较小, 故吸收效率较低. 由图 3 还可得出, 当入射抽运光半径超过 $45 \mu\text{m}$ 时对应的吸收效率有所提升, 造成这一异常变化的原因是: 以高斯光束代表入射抽运光时, 若光束半径取值过大, 则部分入射光能量直接溢出所选计算区域之外, 形成“溢出”损耗, 而并非由掺杂纤芯吸收造成.

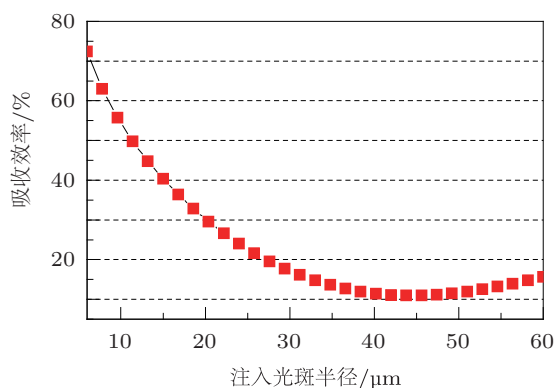


图 3 传播距离为 2 m 时抽运吸收效率随注入光斑尺寸的变化

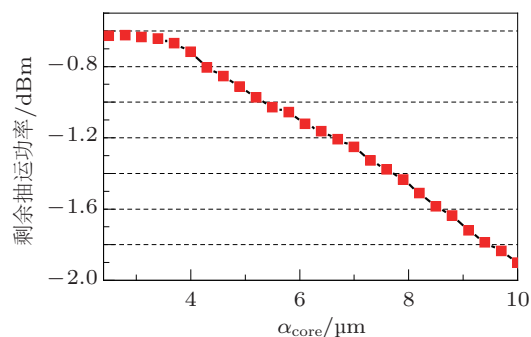


图 4 传播距离为 2 m 时剩余抽运功率随掺杂纤芯尺寸的变化

假设传播距离为 2 m, 内包层半径为 $125 \mu\text{m}$, 入射光束为光斑半径 $25 \mu\text{m}$ 的高斯光束. 当纤芯半径由 $1 \mu\text{m}$ 逐渐增大到 $10 \mu\text{m}$ 时, 可以分别得到相应剩余抽运功率与抽运吸收效率随掺杂纤芯大小的变化曲线, 如图 4 与图 5 所示. 由图 5 可知, 掺杂纤芯的大小对抽运吸收效率的影响是很明显的, 除

了起始阶段 (纤芯半径在 $4 \mu\text{m}$ 以内) 的吸收效率曲线较为平缓外, 其余部分曲线近似一条倾斜的直线, 即抽运吸收效率随掺杂纤芯半径的变大而线性增长. 该现象的解释显而易见, 即大的纤芯具有大的模场直径, 与多模抽运光有较高的重叠率, 能更容易地摄取入射光束, 从而提高抽运效率.

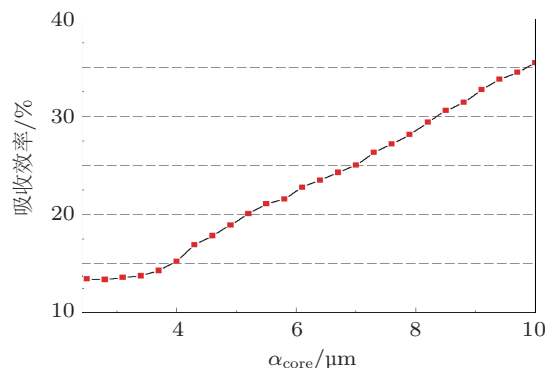


图 5 传播距离为 2 m 时抽运吸收效率随掺杂纤芯尺寸的变化

虽然增大掺杂纤芯面积能有效提高抽运吸收效率, 但纤芯半径的增大将直接导致纤芯中激光的多模运行状态, 致使激光光束质量变差.

从单模光纤的理论可知, 衡量光纤是否支持单模传输的重要参数是其截止波长, 用 λ_{cutoff} 表示, 若无特别指定, 一般默认为光纤 LP_{11} 模的截止波长. 截止波长的物理意义是: 当光纤中传输光波的波长大于 λ_{cutoff} 时, 该光纤只支持基模传输, 称为单模光纤. 截止波长可表示为

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{cutoff}} &= \frac{2\pi a_{\text{core}}}{V_c} n_{\text{core}} \sqrt{2\Delta} \\ &= \frac{2\pi a_{\text{core}}}{V_c} \text{NA}_{\text{core}}, \end{aligned} \quad (11)$$

其中 a_{core} 为纤芯半径, V_c 为归一化截止频率, 对于阶跃光纤, $V_c = 2.405$, Δ 为纤芯与内包层的相对折射率差, NA_{core} 为纤芯数值孔径, $\text{NA}_{\text{core}} = n_{\text{core}} \sqrt{2\Delta}$. 由 (11) 式可知, 截止波长由 a_{core} 与 NA_{core} 共同决定. 双包层光纤的内包层材料通常为纯石英, 其折射率是固定的, 因此纤芯数值孔径由纤芯折射率 n_{core} 决定. 一般情况下, 双包层光纤使用两种经优化后的纤芯数值孔径值, $\text{NA}_{\text{core}} = 0.1$ 与 $\text{NA}_{\text{core}} = 0.2$, 该数值孔径值可通过控制掺杂纤芯的折射率而得到. 利用 (11) 式, 分别得出了两不同数值孔径下截止波长随纤芯半径的变化关系, 如图 6 所示. 由图 6 可知, 两种数值孔径下截止波长均随着纤芯半径的增大而向长波长方向移动. 仍以掺铒双包层光纤为例, 设

纤芯中产生激光波长为 $1.55 \mu\text{m}$, 若保证纤芯单模传输, 则对应 $\text{NA}_{\text{core}} = 0.1$ 的纤芯半径最大值为 $a_{\text{core}} = 6 \mu\text{m}$, 对应 $\text{NA}_{\text{core}} = 0.2$ 的纤芯半径最大值为 $a_{\text{core}} = 3 \mu\text{m}$, 如图 6 中所示. 若超过相应纤芯最大值, 则纤芯中激光则失去单模状态, 表现为多模形式. 通过以上的分析可知, 小的数值孔径将会减弱纤芯对激光的束缚, 不利于获得高质量光束, 但可允许有较大的纤芯半径, 能提高抽运吸收效率; 大的数值孔径可增强纤芯对激光的束缚, 有利于获得高质量光束, 但只允许较小的纤芯半径与之匹配, 不利于抽运吸收.

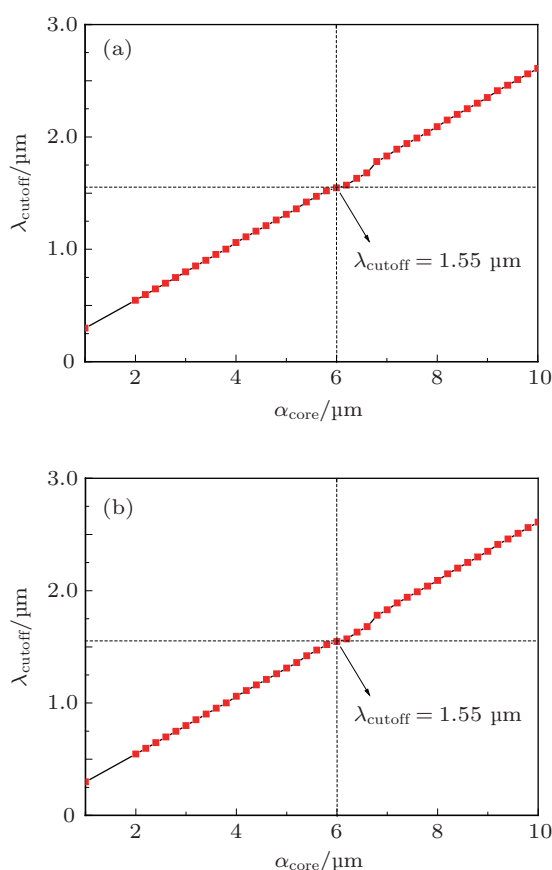


图 6 不同数值孔径下截止波长与纤芯半径的变化关系 (a) $\text{NA}_{\text{core}} = 0.1$; (b) $\text{NA}_{\text{core}} = 0.2$

3.2 破缺程度对 D 形内包层双包层光纤 (DCF) 抽运吸收特性的影响

假设掺杂纤芯半径为 $6 \mu\text{m}$, 内包层半径为 $62.5 \mu\text{m}$, 抽运光为高斯光束, 其光斑半径为 $25 \mu\text{m}$, 传播距离为 2m . 对于切去圆冠的高度分别为 $32.5, 22.5$ 和 $12.5 \mu\text{m}$, 即剩余球台高度 h 分别为 $30, 40$ 和 $50 \mu\text{m}$ 三种情况, 利用 RTM 法计算所得的不同破缺程度下 D 形双包层光纤中剩余

抽运功率和抽运吸收效率随传播距离变化的特性分别如图 7(a) 和 (b) 所示.

由图 7 可知, 抽运光进入掺杂光纤内包层后随着在光纤内的传输, 被掺杂光纤迅速吸收. 当到达一定的数值后, 随着抽运光在光纤内的传输, 这种吸收趋势逐渐减弱, 直至趋于稳定. 比较三种不同破缺程度对应的曲线可以发现, 球台高度为 $30 \mu\text{m}$ 的 D 形结构吸收效率最高, 球台高度为 $50 \mu\text{m}$ 的 D 形结构吸收效率最低, 即抽运吸收效率随着破缺程度的提高逐渐增大. 只是这种吸收效率的差别并不明显, 全程最大吸收效率差不超过 3% . 该结果无疑是令人鼓舞的, 说明 D 形光纤的抽运吸收特性受破缺程度影响不大, 完全可以利用较低破缺程度的 D 形双包层光纤便能获得较高的抽运吸收效率, 从而有效地避免了高破缺度引发的光纤高传输损耗问题.

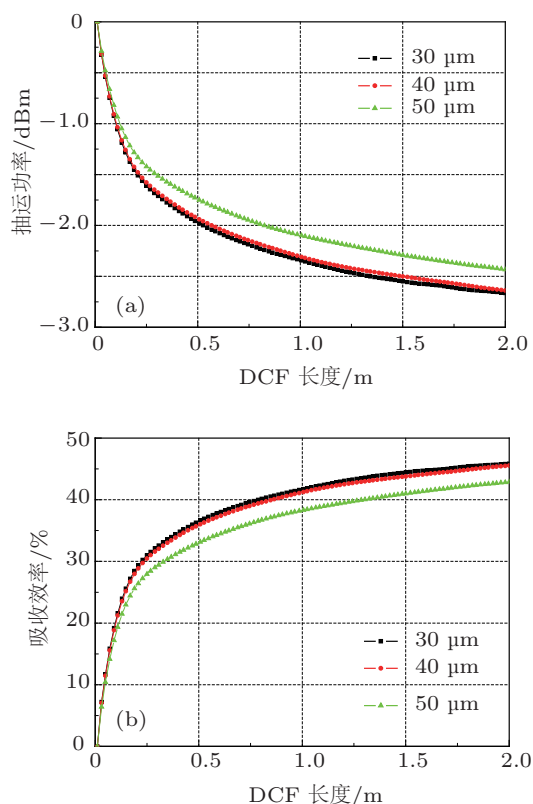


图 7 不同破缺程度下 D 形双包层光纤抽运特性分布 (a) 剩余抽运功率; (b) 抽运吸收效率

这一现象的成因可归结为 D 形不对称结构引发的抽运光的混沌分布特性. 在 D 形内包层结构的掺杂光纤中, 抽运光以最大的无序程度迅速分布到内包层的整个截面, 即呈现出抽运光分布的混沌特征. 正是由于抽运光的这种混沌分布状态才使得上述三种破缺程度下的抽运吸收效率差别有限.

3.3 具有渐变折射率内包层 DCF 的抽运吸收特性

渐变折射率光纤由于具有连续变化的折射率分布, 因此表现出与阶跃折射率光纤不同的导波光学特性. 由于大芯径的渐变折射率光纤对大光斑尺寸的入射光具有汇聚作用, 因此可以直观上认为具有渐变折射率分布的内包层结构的光纤更有助于纤芯对抽运光的吸收.

设掺杂光纤的内包层具有抛物线形折射率分布, 最大折射率为 1.45067, 最小折射率为 1.3756, 分别对应阶跃型 DCF 内外包层的折射率. 材料参数、光纤尺寸、模拟条件均与 3.1 中保持一致. 令入射抽运光的光斑半径由 $6\ \mu\text{m}$ 逐渐增大到 $60\ \mu\text{m}$, 计算可得相应的剩余抽运光功率与抽运吸收效率随注入光斑尺寸变化的特性分别如图 8(a) 和 (b) 所示.

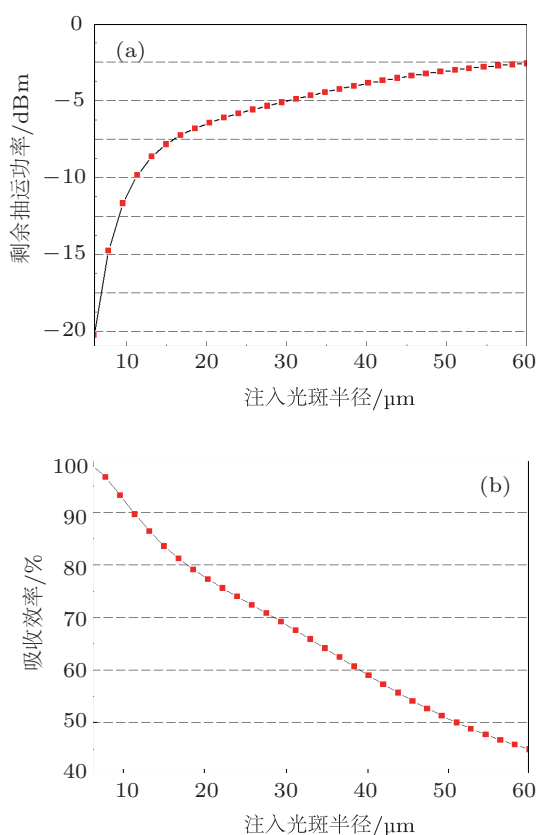


图 8 传播距离为 2 m 时渐变折射率内包层的双包层光纤抽运特性分布 (a) 抽运光功率; (b) 抽运吸收效率

比较图 8(a) 和 (b), 可以看出两图中的曲线走势所反映的抽运光吸收特性是一致的, 即随着入射抽运光束宽度的增大, 吸收效率逐渐降低. 渐变折射率内包层型的双包层光纤抽运吸收效率接近 99% (对应入射光斑半径 $6\ \mu\text{m}$), 最小吸收效率

约 45% (对应入射光斑半径 $60\ \mu\text{m}$). 而相同入射抽运下较阶跃折射率内包层型的吸收效率高约 30%. 由此说明, 渐变折射率内包层结构具有优异的对抽运光的吸收特性.

3.4 不同内包层结构 DCF 的抽运吸收特性

针对常用的圆形、偏心形、跑道形、矩形、切角矩形、正多边形、D 形等几种双包层光纤的内包层结构, 利用束传播法模拟各种类型 DCF 的抽运吸收过程, 并给出定量的数值结果.

为确保最终的数值结果具有高可比性, 在建模时需要考虑将各种情况下的模拟条件尽可能地保持一致, 这要求入射抽运光束大小相同, 掺杂纤芯半径、纤芯吸收系数一致, 内包层面积相等. 基于上述考虑, 设定入射抽运光为光斑半径 $27.5\ \mu\text{m}$ 的高斯光束, 纤芯半径统一取 $6\ \mu\text{m}$, 内包层面积为 $12272\ \mu\text{m}^2$. 令纤芯的吸收系数为 $300\ \text{dB/m}$, 对应纤芯复折射率为 $1.4542 - i(6.20551 \times 10^{-6})$. 内包层的几何尺寸分别为: 圆形、偏心形、渐变折射率 (GIF) 型内包层半径为 $62.5\ \mu\text{m}$; 正方形内包层边长为 $111\ \mu\text{m}$; 跑道形内包层垂直宽度为 $90\ \mu\text{m}$, 水平长为 $115\ \mu\text{m}$, 两侧圆弧半径为 $73\ \mu\text{m}$ (圆弧对应的圆心位置与跑道中心重合); 切角矩形长为 $136\ \mu\text{m}$, 宽为 $100\ \mu\text{m}$, 切角长度为 $52\ \mu\text{m}$ (等腰切角); D 形内包层半径为 $71.78\ \mu\text{m}$, 切去圆冠高度为 $41.78\ \mu\text{m}$. 图 9 所示为数值建模中各种类型双包层光纤折射率分布的三维结构.

图 10(a) 和 (b) 分别表示上述几种双包层光纤的剩余抽运功率和抽运吸收效率随光纤传播距离变化的特性曲线.

由图 10 可以看出, 对于圆形内包层 DCF, 从抽运光注入其端面开始较短的距离内, 抽运光被纤芯迅速吸收, 吸收效率随光纤长度变化的曲线具有最大的斜率. 但随着沿光纤内包层传播距离的增长, 吸收效率的增速迅速减缓, 吸收效率随光纤长度变化曲线的斜率逐渐减小, 直至达到一个定值. 对于非圆内包层型双包层光纤, 从抽运光注入其端面开始的较短传播距离内, 均具有比圆形内包层型双包层光纤低的抽运吸收效率. 但是, 随着抽运光在光纤内包层传播距离的增长, 抽运光吸收特性曲线的斜率基本保持不变. 当传播距离超过 $0.8\ \text{m}$ 时, 所有非圆类型双包层光纤的抽运吸收效率均超过了圆形双包层光纤.

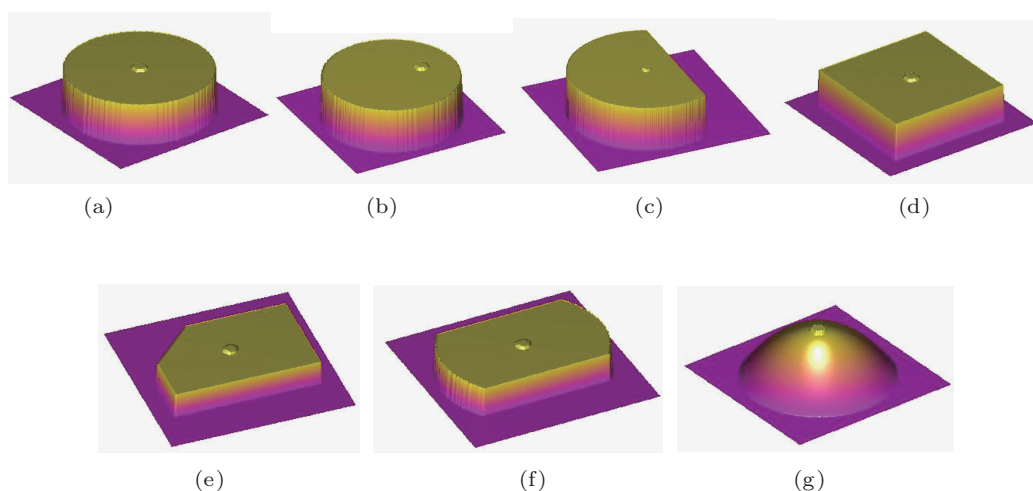


图9 各种类型双包层光纤的折射率三维分布 (a) 圆形; (b) 偏心形; (c) D形; (d) 正方形; (e) 切角矩形; (f) 跑道形; (g) GIF 型

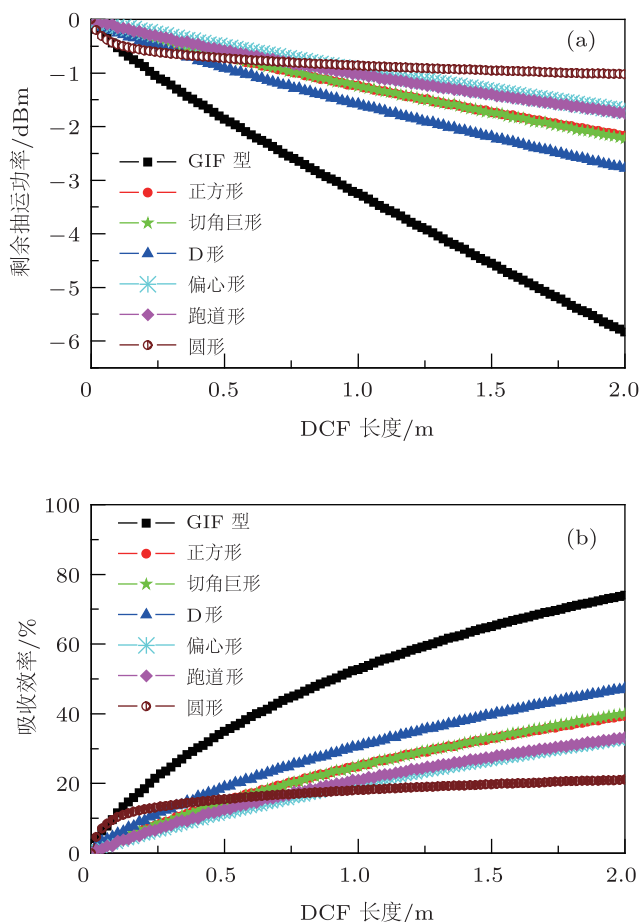


图10 不同类型双包层光纤抽运特性分布曲线 (a) 剩余抽运功率; (b) 抽运吸收效率

图 11 所示为七种不同类型 DCF 的抽运吸收系数随抽运光在光纤内包层传播距离而变化的特性曲线. 在抽运光注入双包层光纤端面的初始阶段, 各种类型光纤的抽运吸收系数均经历了一个由低

到高再到低的迅变过程. 这其中以圆形内包层 DCF 的变化最为剧烈. 随着传播距离的增长, 各种类型光纤的抽运吸收系数逐渐趋于恒定, 其中, 渐变折射率内包层型 DCF 具有最高的抽运吸收系数, 往下依次为 D 形、切角矩形、正方形、跑道形、偏心形, 圆形内包层 DCF 具有最低的抽运吸收系数.

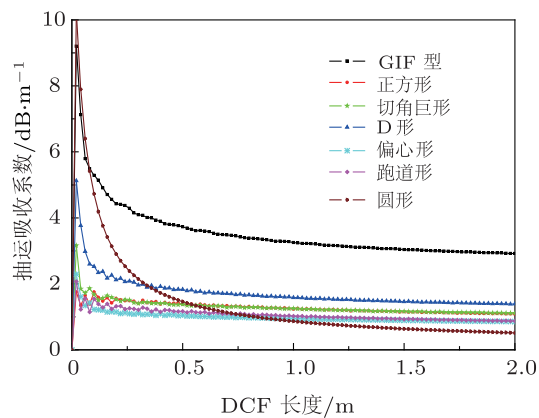


图11 不同类型 DCF 抽运吸收系数随传播距离的变化曲线

综合考虑抽运光在双包层光纤中的吸收特性, 可以得到各种光纤的全程抽运吸收系数与双包层光纤内包层形状的对对应关系, 如图 12 所示.

由上述分析可知, 全程抽运吸收系数与双包层光纤内包层形状有关. GIF 型双包层光纤具有比圆形内包层光纤高 5 倍的抽运吸收系数, 因此为了提高光纤对抽运光的吸收效率, 在双包层光纤的设计中尽可能采用 GIF 型内包层结构. 只是这种结构的光纤在制作工艺上具有一定难度. 由于上述分析所

采用的模拟条件相同, 因此得到的结论具有普适性.

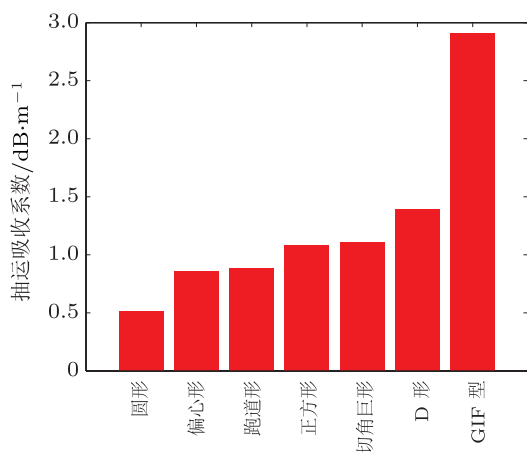


图 12 全程抽运吸收系数与内包层形状的对对应关系

4 结论

本文在考虑纤芯复折射率分布的条件下, 建立了有限差分束传播法的双包层稀土掺杂光纤抽运吸收效率的数值分析模型. 利用该模型对圆形、偏心形、D形、正方形、切角矩形、跑道形、GIF型等常用的内包层外边界结构下双包层光纤中抽运光的分布及全程抽运吸收系数进行了详细的数值分析, 得出 GIF 型双包层光纤具有比圆形内包层光纤高 5 倍的全程抽运吸收系数, 其余几种内包层结构双包层光纤的全程抽运吸收系数介于圆型和 GIF 型内包层之间. 因此为了提高光纤对抽运光的吸收效率, 在双包层稀土掺杂光纤的设计中应尽可能采用折射率渐变型内包层结构. 这一结论具有普适性, 对双包层光纤的优化设计具有一定的指导意义.

- [1] Yan F P, Wei H, Fu Y J, Wang L, Zheng K, Mao X Q, Liu P, Peng J, Liu L S, Jian S S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6300 (in Chinese) [延凤平, 魏淮, 傅永军, 王琳, 郑凯, 毛向桥, 刘鹏, 彭健, 刘利松, 简水生 2009 物理学报 **58** 6300]
- [2] Liu C H, Ehlers B, Doerfel F 2004 *Elec. Lett.* **40** 1471
- [3] Jeong Y, Sahu J K, Payne D N 2004 *Opt. Express* **12** 6088
- [4] Jackson S D, Mossman S 2003 *Appl. Opt.* **42** 2702
- [5] Zhang Y J, Yao B Q, Ju Y L, Wang Y Z 2005 *Opt. Express* **13** 1085
- [6] Zhu H T, Lou Q H, Zhou J, Qi Y F, Dong J X, Wei Y R 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4966 (in Chinese) [朱洪涛, 楼祺洪, 周军, 漆云凤, 董景星, 魏运荣 2008 物理学报 **57** 4966]
- [7] Fu S G, Fan W D, Zhang Q, Wang Z, Li L J, Zhang C S, Yuan S Z, Dong X Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4262 (in Chinese) [付圣贵, 范万德, 张强, 王志, 李丽君, 张春书, 袁树忠, 董孝义 2004 物理学报 **53** 4262]
- [8] Zhao H M, Lou Q H, Zhou J, Dong J X, Wei Y R, Wang Z J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3525 (in Chinese) [赵宏明, 楼祺洪, 周军, 董景星, 魏运荣, 王之江 2008 物理学报 **57** 3525]
- [9] Fu Y J, Jian W, Zheng K, Yan F P, Chang D Y, Jian S S 2005 *Chin. Phys.* **14** 2338
- [10] Yan F P, Ji Y N, Wang L, Gong T R, Liu P, Tao P L, Wang W J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7899 (in Chinese) [延凤平, 嵇叶楠, 王琳, 龚桃荣, 刘鹏, 陶沛琳, 王文杰 2010 物理学报 **59** 7899]
- [11] Kouznetsov D, Moloney J V, Wright E M 2001 *J. Opt. Soc. Am. B* **18** 743
- [12] Liu A, Ueda K 1996 *Opt. Commun.* **132** 511
- [13] Gonthier F, Martineau L, Azami N 2004 *Photo. West* **173** 5335
- [14] Leproux P, Février S, Doy V 2001 *Opt. Fiber Tech.* **7** 324
- [15] Wang Z H, Zhang H 2003 *Micro. Opt. Tech. Lett.* **37** 111
- [16] Sader J E 1990 *Opt. Lett.* **15** 105
- [17] Zhao C J, Zhou P, Zeng X H, Tang Z X, Fan D Y 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 409 (in Chinese) [赵楚军, 周萍, 曾夏辉, 唐志祥, 范滇元 2008 光学学报 **28** 409]
- [18] Liu W, Liang C W, Xian S S 2001 *J. Opt. Laser* **12** 374

Analysis of absorption property for pumping laser with double cladding rare earth doped fiber*

Yan Feng-Ping^{1)2)†} Liu Peng³⁾ Tao Pei-Lin¹⁾ Li Qi¹⁾ Peng Wan-Jing¹⁾
Feng Ting¹⁾ Tan Si-Yu¹⁾

1) (*Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*)

2) (*Key Laboratory of All-Optical Networks and Advanced Communications Networks, Ministry of Education, Beijing 100044, China*)

3) (*Physics Department of Xingtai College, Xingtai 054001, China*)

(Received 6 December 2011; revised manuscript received 20 January 2012)

Abstract

In this paper, a pump laser absorption model for double cladding rare earth doped optical fiber is established by using the finite difference beam propagation method combined with complex refractive index profile, and the absorption properties are analyzed in detail for some typical inner cladding structures by using this model. The results can be used to design the double cladding rare earth doped optical fiber.

Keywords: double cladding rare earth doped fiber, Gaussian beam, absorption efficiency, pumping

PACS: 42.25.Bs, 42.60.Pk, 42.81.Bm

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60877042, 61077069), the Science and Technology Research Project of Colleges and Universities in Hebei Province, China (Grant No. Z2011201), and the Science and Technology Development Project of Xingtai, China (Grant No. 2011ZZ052-4).

† E-mail: fpyan@bjtu.edu.cn