

掺铒孔辅助导光光纤的特性研究与优化设计*

郑 凯[†] 常德远 傅永军 魏 淮 延凤平 简 伟 简水生

(北京交通大学光波技术研究所,北京 100044)

(2006 年 4 月 30 日收到,2006 年 6 月 19 日收到修改稿)

掺铒孔辅助导光光纤是由掺铒的高折射率纤芯、低折射率包层和少量的空气孔组成. 采用有限元法分析了掺铒孔辅助导光光纤的模式特性,给出了数值计算截止波长和模场直径的方法,提出了改进的平均粒子数反转迭代算法来数值计算掺铒光纤放大器的增益和噪声系数. 研究空气孔对掺铒孔辅助导光光纤的截止波长、模场直径和放大器的增益系数的影响. 发现减小相对孔芯距的值,可使截止波长向短波长移动,减小模场直径的值;当孔的相对大小较大时,截止波长、模场直径和增益的最大值基本上不随孔的相对大小的增大而改变. 最后,综合考虑掺铒光纤基模和二阶模的截止波长、与普通单模光纤的熔接损耗、放大器的增益和噪声系数等因素,优化设计了掺铒孔辅助导光光纤的四个结构参量——纤芯半径、纤芯与包层的折射率差、相对孔芯距和孔的相对大小.

关键词:孔辅助导光光纤,掺铒光纤,光纤放大器,有限元法

PACC:4281,4255N

1. 引 言

光子晶体光纤具有传统普通单模光纤所无法比拟的特性,故受到了研究者的广泛关注,成为近几年光纤研究领域的热点之一. 光子晶体光纤的包层中分布着空气孔,在中心处存在缺陷,光可以沿着此缺陷传播. 孔辅助导光光纤(hole-assisted lightguide fiber, HALF)是光子晶体光纤中的一个重要的分支, HALF 是由高折射率的纤芯、低折射率的包层和围绕在纤芯周围的一些空气孔组成的. Hasegawa 等人制作出了具有大反常色散和低损耗等特性的 HALF^[1]. 在 HALF 的纤芯区域掺杂铒离子,可制作出掺铒孔辅助导光光纤(Erbium-doped HALF, EDHALF). Prudenzano 理论分析了 EDHALF 放大器的特性^[2],但没有详细地研究 EDHALF 各结构参量对放大器性能的影响. D'Orazio 等人仅研究了 EDHALF 的空气孔数目对放大器性能的影响^[3]. 本文采用有限元法分析 EDHALF 的模式特性,提出了改进的平均粒子数反转迭代算法来模拟计算 EDHALF 放大器的特性,并给出了数值计算 EDHALF 截止波长和模场直径的方法. 分析空气孔对

EDHALF 截止波长、模场直径和放大器的增益和噪声系数的影响. 最后,根据掺铒光纤的设计原则,优化了 EDHALF 的结构参量. 同时,比较了 EDHALF 和普通掺铒光纤放大器的特性.

2. 理论模型

基于均匀展宽的二能级 Giles 模型,掺铒光纤放大器的速率方程可以写为如下形式^[4]:

$$\begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= -(W_p + W_{12})N_1 + (W_{21} + A_{21})N_2, \\ N_1 + N_2 &= N_t, \end{aligned} \quad (1)$$

其中 N_1 和 N_2 分别是能级⁴ $I_{15/2}$ 和⁴ $I_{13/2}$ 上的粒子数密度; N_t 是总粒子数密度; W_p 是能级⁴ $I_{15/2}$ 和⁴ $I_{11/2}$ 之间的受激吸收跃迁概率; A_{21} , W_{12} 和 W_{21} 分别是能级⁴ $I_{15/2}$ 和⁴ $I_{13/2}$ 之间的自发发射、受激吸收和受激发射跃迁概率. W_p , W_{12} 和 W_{21} 由下式给出^[5]:

$$\begin{aligned} W_p &= \frac{\sigma_a(v_p)}{h\nu_p} P_p(z) \mathcal{K}(x, y, \nu_p), \\ W_{12} &= \frac{\sigma_a(v_s)}{h\nu_s} P_s(z) \mathcal{K}(x, y, \nu_s) \end{aligned}$$

* 国家高技术研究发展计划(863)批准号:2002AA312190,2004AA31g200 资助的课题.

[†] E-mail: zkai Zheng@163.com

$$\begin{aligned}
& + \sum_{i=1}^N \frac{\sigma_a(v_i)}{hv_i} (P_{\text{ASE}}^+(z, v_i) + P_{\text{ASE}}^-(z, v_i)) \\
& \times \mathcal{K}(x, y, v_i), \\
W_{21} = & \frac{\sigma_e(v_s)}{hv_s} P_s(z) \mathcal{K}(x, y, v_s) \\
& + \sum_{i=1}^N \frac{\sigma_e(v_i)}{hv_i} (P_{\text{ASE}}^+(z, v_i) + P_{\text{ASE}}^-(z, v_i)) \\
& \times \mathcal{K}(x, y, v_i), \quad (2)
\end{aligned}$$

(2) 式中的 P_p , P_s , P_{ASE}^+ 和 P_{ASE}^- 分别是抽运、信号、前向和反向的放大自发辐射 (amplified spontaneous emission ASE) 的功率; σ_a 和 σ_e 分别是吸收和发射截面积; h 是普朗克常数; 为了模拟计算 ASE 噪声, 以 Δv 为频率间隔把钕离子的增益带宽均分, N 为所离散频率点的个数; I 为归一化纵向功率流密度, 定义为

$$\mathcal{K}(x, y, v) = \frac{\frac{1}{2} \text{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*)_z}{\iint_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} \text{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*)_z dx dy}, \quad (3)$$

其中 \mathbf{E} 和 \mathbf{H} 分别是模式的电场和磁场强度.

抽运、信号和 ASE 功率沿光纤的演化过程可由下式描述^[5]:

$$\begin{aligned}
\frac{dP_p(z)}{dz} &= -[\gamma_p(z) + \alpha(v_p)]P_p(z), \\
\frac{dP_s(z)}{dz} &= [\gamma_{21}(z, v_s) - \gamma_{12}(z, v_s) \\
&\quad - \alpha(v_s)]P_s(z), \\
\frac{dP_{\text{ASE}}^{\pm}(z, v_i)}{dz} &= \pm[\gamma_{21}(z, v_i) - \gamma_{12}(z, v_i) - \alpha(v_i)] \\
&\quad \times P_{\text{ASE}}^{\pm}(z, v_i) \pm 2hv_i \Delta v \gamma_{21}(z, v_i) \quad (4)
\end{aligned}$$

其中, $\alpha(v)$ 为 EDHALF 的背景损耗; γ_p , γ_{12} 和 γ_{21} 是吸收和发射系数, 定义为

$$\begin{aligned}
\gamma_p(z) &= \iint_{\text{doped}} \sigma_a(v_p) \mathcal{K}(x, y, v_p) N_1(x, y, z) dx dy, \\
\gamma_{12}(z, v_i) &= \iint_{\text{doped}} \sigma_a(v_i) \mathcal{K}(x, y, v_i) N_1(x, y, z) dx dy, \\
\gamma_{21}(z, v_i) &= \iint_{\text{doped}} \sigma_e(v_i) \mathcal{K}(x, y, v_i) N_2(x, y, z) dx dy, \quad (5)
\end{aligned}$$

式中的“doped”表示积分区域为掺钕区. 方程组(4)的边界条件为

$$\begin{aligned}
P_p(0) &= P_{p0}, \quad P_s(0) = P_{s0}, \quad P_{\text{ASE}}^+(0, v_i) = 0, \\
P_{\text{ASE}}^-(L, v_i) &= 0, \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (6)
\end{aligned}$$

其中, L 为掺钕光纤的长度; P_{p0} 和 P_{s0} 分别为抽运和信号的输入功率值.

掺钕光纤放大器的增益系数 G 和噪声系数 NF 可由下式求出^[3]:

$$G = \frac{P_s(L)}{P_s(0)}, \quad NF = \frac{1}{G} + \frac{P_{\text{ASE}}^+(L, v_s)}{G h v_s \Delta v}. \quad (7)$$

3. 数值计算方法

EDHALF 的结构示意图如图 1 所示: 中心为掺钕的纤芯, 半径为 R_c ; 石英包层中有一圈直径为 d 的空气孔, 数目通常为 6 个; 纤芯与空气孔的外边缘的距离为 D_{hc} ; 相邻空气孔的间距为 Λ . 表征 EDHALF 特性的结构参量有纤芯半径 R_c , 纤芯与包层的折射率差 $\Delta = n_{\text{core}} - n_{\text{clad}}$, 相对孔芯距 $q = D_{\text{hc}}/R_c$ 和孔的相对大小 $f = d/\Lambda$. 其中, n_{core} 和 n_{clad} 分别为纤芯和石英包层的折射率.

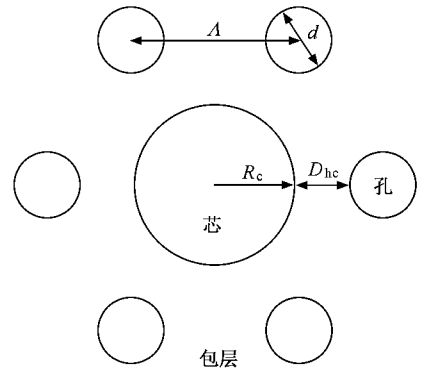


图 1 EDHALF 的结构示意图

3.1. 模场的数值计算方法

在 EDHALF 中传输的各模式的磁场强度 \mathbf{H} 满足亥姆霍兹方程

$$\nabla \times (n^{-2} \nabla \times \mathbf{H}) - k_0^2 \mathbf{H} = 0, \quad (8)$$

其中, $\mathbf{H} = \mathbf{H}(x, y) \exp(-j\beta z)$, n 为 EDHALF 横截面上的折射率分布, k_0 是真空中波数, β 为模式的传播常数. 应用有限元法^[6]可求出方程(8)的特征值和特征向量, 即各模式的传播常数 β 和磁场强度 \mathbf{H} . 给定 EDHALF 的四个结构参量值, 可以唯一确定 EDHALF 的折射率分布, 进而确定在波长 λ 处的各模式的电磁场强度和传播常数.

3.2. 吸收和发射系数的数值计算

首先, 研究 EDHALF 的基模纵向功率流密度在横截面上的分布特性. 利用(3)式数值计算了结构

参数为 $R_c = 2.2 \mu\text{m}$, $\Delta = 0.01$, $q = 0.7$, $f = 0.4$ 的 EDHALF 在波长 $0.98 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$ 处的归一化纵向功率流密度 I 其等高线分布分别如图 2(a) 和 (b) 中的实线所示. 从图中看出: 在短波长, 功率流主要集中在纤芯, I 的等高线为圆形; 而在长波长, 功率流向包层中扩散, I 在包层区域的等高线变为六边形, 但在纤芯区域的等高线仍为圆形. 这一点也是

容易理解的: 由于 EDHALF 纤芯的折射率高于石英层的, 因而, EDHALF 在纤芯区域的功率流分布特征与普通掺铒光纤的相似^[7]. 这表明: 在掺铒区域, $I(x, y, z)$ 的值与切向坐标 φ 无关, 即 $I(x, y, z) = I(r, z)$. 由公式 (1) 和 (2) 知: 粒子数密度 N_1 和 N_2 也与切向坐标 φ 无关, 即

$$N_1(x, y, z) = N_1(r, z), N_2(x, y, z) = N_2(r, z).$$

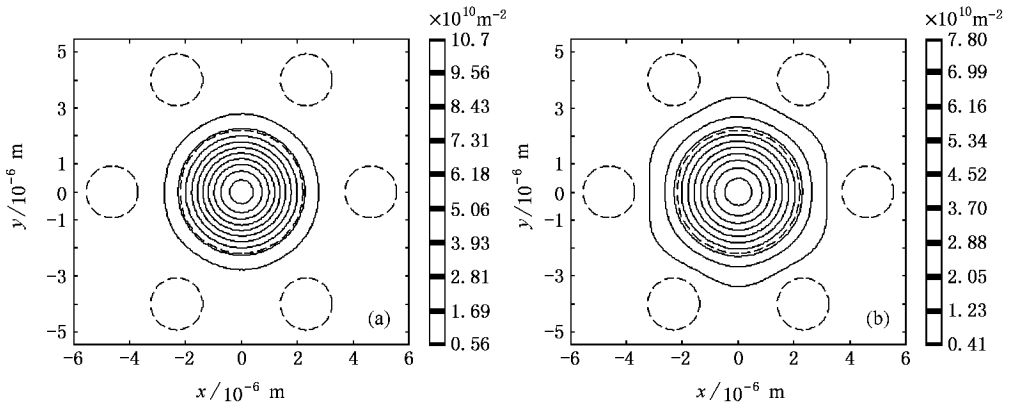


图 2 结构参数为 $R_c = 2.2 \mu\text{m}$, $\Delta = 0.01$, $q = 0.7$, $f = 0.4$ 的 EDHALF 在波长 $0.98 \mu\text{m}$ (a) 和 $1.55 \mu\text{m}$ (b) 处的归一化纵向功率流密度的等高线分布图

因而 (5) 式中的积分可以写成简单的求和形式

$$\begin{aligned} \gamma_p(z) &= 2\pi \sum_{m=1}^M \sigma_a(v_p) I(r_m, v_p) N_1(r_m, z) r_m \Delta r, \\ \gamma_{12}(z, v_i) &= 2\pi \sum_{m=1}^M \sigma_a(v_i) I(r_m, v_i) N_1(r_m, z) r_m \Delta r, \\ \gamma_{21}(z, v_i) &= 2\pi \sum_{m=1}^M \sigma_e(v_i) I(r_m, v_i) N_2(r_m, z) r_m \Delta r, \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $r_m = (m - 0.5)\Delta r$ ($m = 1, 2, \dots, M$), $\Delta r = \frac{R_c}{M}$, M 为离散点的个数.

3.3. 传输方程的数值计算方法

文献 [8] 提出的平均粒子数反转度迭代算法能准确高效的模拟计算掺铒光纤放大器的特性, 但此算法不能考虑功率流的横截面特性. 为此, 改进了原有的算法来求解传输方程, 求解过程如下:

1) 把光纤的掺铒区域沿 z 方向均匀分成 n 小段, 沿横截面分成 M 个环形区域, 如图 3 所示, 其划分点为 $0 = z_0 < z_1 < \dots < z_n = L$, $z_j = \frac{j}{n}L$, $0 = r'_0 < r'_1 < \dots < r'_M = R_c$, $r'_m = \frac{m}{M}R_c$. 由第 3.2 节知: 只要划分

的足够细, 就可以认为每一小段圆环体内能级⁴ $I_{15/2}$ 上的粒子数密度 N_1 是常数. 由于 $N_1(r, z)$ 是光滑而缓变的函数, 因而, n 和 M 也不必取的过大, 通常, n 取 40, M 取 10 即可.

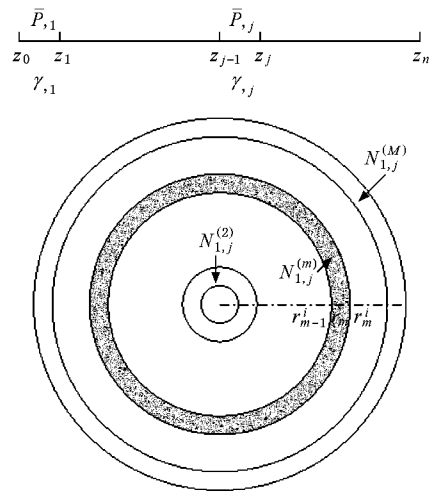


图 3 划分示意图

2) 设第 j 段的第 m 层圆环体内能级⁴ $I_{15/2}$ 上的粒子数密度为 $N_{1,j}^{(m)}$, 利用 (9) 式就可以求出第 j 段上的吸收和发射系数 $\gamma_{p,j}$, $\gamma_{12,j}(v_i)$ 和 $\gamma_{21,j}(v_i)$. 由于方程组 (4) 在每小段 z_{j-1}, z_j 上的系数为常数, 所以有

解析解. 这样, 就可以得到 z 轴上各划分点处的功率所满足的递推式

$$\begin{aligned} P_p(z_j) &= P_p(z_{j-1}) \exp[-(\gamma_{p,j} + \alpha(v_p))\Delta l], \\ P_s(z_j) &= P_s(z_{j-1}) \exp[\kappa_j(v_s)\Delta l], \\ P_{ASE}^+(z_j, \nu_i) &= P_{ASE}^+(z_{j-1}, \nu_i) \exp[\kappa_j(v_i)\Delta l] \\ &\quad + \frac{2h\nu_i\Delta v\gamma_{21,j}}{\kappa_j(v_i)} \{ \exp[\kappa_j(v_i)\Delta l] - 1 \}, \\ P_{ASE}^-(z_{j-1}, \nu_i) &= P_{ASE}^-(z_j, \nu_i) \exp[\kappa_j(v_i)\Delta l] \\ &\quad + \frac{2h\nu_i\Delta v\gamma_{21,j}}{\kappa_j(v_i)} \{ \exp[\kappa_j(v_i)\Delta l] - 1 \}, \\ \kappa_j(v) &= \gamma_{21,j}(v) - \gamma_{12,j}(v) - \alpha(v), \\ \Delta l &= \frac{L}{n}, \end{aligned} \quad (10)$$

进而, 可以推出在区间 $[z_{j-1}, z_j]$ 上的平均功率值,

$$\begin{aligned} \bar{P}_{p,j} &= P_p(z_{j-1}) \frac{\exp[-(\gamma_{p,j} + \alpha(v_p))\Delta l] - 1}{-(\gamma_{p,j} + \alpha(v_p))\Delta l}, \\ \bar{P}_{s,j} &= P_s(z_{j-1}) \frac{\exp[\kappa_j(v_s)\Delta l] - 1}{\kappa_j(v_s)\Delta l}, \\ \bar{P}_{ASE,j}^+(v_i) &= P_{ASE}^+(z_{j-1}, \nu_i) \frac{\exp[\kappa_j(v_i)\Delta l] - 1}{\kappa_j(v_i)\Delta l} \\ &\quad + \frac{2h\nu_i\Delta v\gamma_{21,j}}{\kappa_j(v_i)} \left\{ \frac{\exp[\kappa_j(v_i)\Delta l] - 1}{\kappa_j(v_i)\Delta l} - 1 \right\}, \\ \bar{P}_{ASE,j}^-(v_i) &= P_{ASE}^-(z_j, \nu_i) \frac{\exp[\kappa_j(v_i)\Delta l] - 1}{\kappa_j(v_i)\Delta l} \\ &\quad + \frac{2h\nu_i\Delta v\gamma_{21,j}}{\kappa_j(v_i)} \left\{ \frac{\exp[\kappa_j(v_i)\Delta l] - 1}{\kappa_j(v_i)\Delta l} - 1 \right\}, \end{aligned} \quad (11)$$

3) 若给定 $N_{1,j}^{(m)}$ 的初值, 利用(9)和(11)式可以推出 \bar{P}_j , 再通过公式(1)和(2), 就可以求出新的 $N_{1,j}^{(m)}$. 实际上, 传输方程组(4)就转化为非线性方程组

$$F(N_{1,j}^{(m)}) - N_{1,j}^{(m)} = 0, \quad (12)$$

可采用 Broyden 算法求解方程组(12).

3.4. 截止波长的数值计算

EDHALF 导模的有效折射率可能低于包层的折射率^[7,9]. 理论上, EDHALF 截止波长的定义为: 模式的有效折射率刚好等于包层有效折射率时所在的波长值^[9]. 但是, 当 EDHALF 模式有效折射率低于包层折射率时, 该模式成为泄漏模^[7], 难以束缚住光^[2,40]. 弯曲损耗值大, 模式易被截止掉. 所以, EDHALF 截止波长的定义应为: 模式的有效折射率刚好等于包层折射率时所在的波长值.

给出数值计算 EDHALF 模式截止波长的方法.

石英包层的折射率 $n_{\text{clad}}(\lambda)$ 可由 Sellmeier 公式给出. 给定 EDHALF 的四个结构参量, 利用有限法可求出在波长 λ 处各模式的传播常数 $\beta(\lambda)$; 再利用公式 $n_{\text{eff}}(\lambda) = \frac{\lambda\beta(\lambda)}{2\pi}$, 可得到各模式的有效折射率 $n_{\text{eff}}(\lambda)$. 各模式的 $n_{\text{eff}}(\lambda)$ 与 $n_{\text{clad}}(\lambda)$ 的交点所处的波长值即为该模式的截止波长值.

3.5. 模场直径的数值计算

模场直径是单模光纤所特有的一个重要参数, 它的取值影响着光纤的接续损耗和弯曲损耗等, 其大小可由归一化纵向功率流密度的二阶距得到^[11]:

$$\alpha(v) = 2\sqrt{2} \left(\iint_{-\infty}^{\infty} K(x, y, v) (x^2 + y^2) dx dy \right)^{1/2}, \quad (13)$$

根据高斯光束传播理论, EDHALF 和普通单模光纤的熔接损耗可由下式估计得出^[12],

$$\alpha_{\text{sp}} = 20 \lg \frac{\omega^2 + \omega_{\text{SMF}}^2}{2\omega\omega_{\text{SMF}}} \text{ (dB)}, \quad (14)$$

其中 ω 和 ω_{SMF} 分别为 EDHALF 和普通单模光纤的模场直径.

4. 讨 论

4.1. 孔的相对大小对放大器性能的影响

为了研究孔的相对大小对放大器的增益和噪声系数的影响, 我们把结构参量 R_c , Δ 和 q 分别固定为 $2.2 \mu\text{m}$, 0.01 和 0.7 , 分别数值计算了 $f = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$ 的 EDHALF 放大器的增益和噪声系数随光纤长度的变化趋势, 从而得到了增益和噪声系数在 L - f 平面上的等高线, 分别如图 4(a) 和 (b) 所示. 计算中所用的参数为: $P_p(0) = 40 \text{ mW}$, $\lambda_p = 0.98 \mu\text{m}$, $P_s(0) = -30 \text{ dBm}$, $\lambda_s = 1.55 \mu\text{m}$, $N_i = 5 \times 10^{24} \text{ ions/m}^3$. 从图中看出: 当孔的相对大小 $f > 0.3$ 时, 增益和噪声系数的等高线几乎和 f 轴平行, 这表明: 当 $f > 0.3$ 时, 在光纤长度 L 相同的前提下, 增益和噪声系数基本上与结构参量 f 无关. 当 $f < 0.3$ 时, 在光纤长度 L 相同的前提下, 增益和噪声系数随着 f 的增大而变大. 掺钕光纤放大器的增益系数达到最大值 G_{max} 时, 所对应的光纤长度记作 $L(G_{\text{max}})$. 从图 4(a) 看出: 当 $f > 0.3$ 时, 不同 f 的 EDHALF 放大器的 G_{max} 相差不大, 大约都在 32 dB 左右, 而且 $L(G_{\text{max}})$ 也相差不大, 都在 13 m 左右.

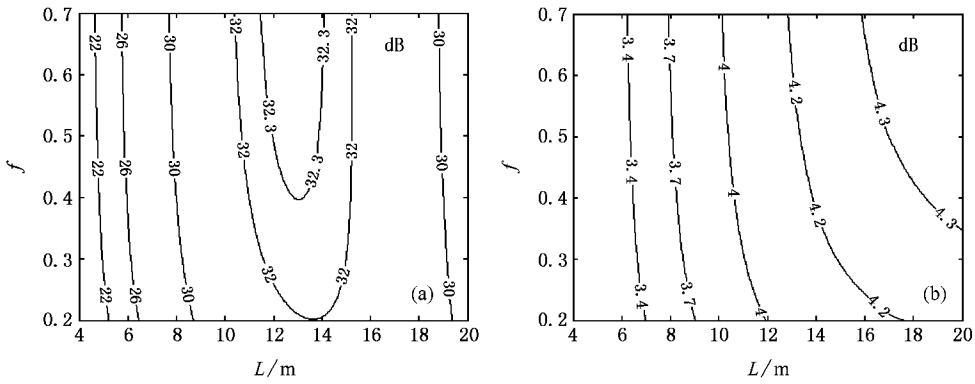


图 4 增益 (a) 和噪声系数 (b) 在 L - f 平面上的等高线

4.2. 孔对 EDHALF 截止波长的影响

为了研究结构参量 q 和 f 对 EDHALF 截止波长的影响, 我们把结构参量 R_c 和 Δ 分别固定为 $2.2 \mu\text{m}$ 和 0.01 , 数值计算了不同 q 和 f 组合的 EDHALF 的二阶模和基模的截止波长, 从而得到了二阶模和基模的截止波长在 q - f 平面上的等高线, 分别如图 5(a) 和 (b) 所示, 其等高线的间距分别为 $0.03 \mu\text{m}$ 和 $0.08 \mu\text{m}$. 从图 5(a) 看出: 在相对孔芯距 $q < 1$ 的区域, 二阶模截止波长的等高线密集, 这表明截止波长

λ_h 随着相对孔芯距的减小而快速的向短波长移动; 而在 $q > 1$ 的区域, 等高线稀疏, 表明截止波长 λ_h 随着相对孔芯距的增大而缓慢的增大. 结构参量为 $R_c = 2.2 \mu\text{m}$, $\Delta = 0.01$ 的普通掺铒光纤的二阶模截止波长为 $0.98 \mu\text{m}$; 而 $q = 2$ 的 EDHALF 二阶模截止波长大约在 $0.95 \mu\text{m}$, 与普通光纤的截止波长相差无几了. 在孔的相对大小 $f > 0.3$ 的区域, 等高线几乎和 f 轴平行, 这表明当 $f > 0.3$ 时, λ_h 基本不随 f 的增大而变化. 而在空气孔的相对大小 $f < 0.3$ 的区域, λ_h 随着 f 的减小而向长波长移动.

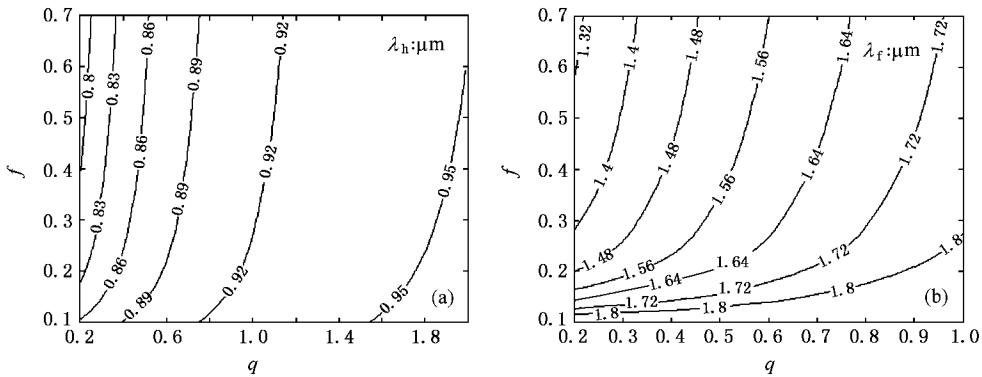


图 5 EDHALF 的二阶模 (a) 和基模 (b) 的截止波长在 q - f 平面上的等高线

从图 5(b) 看出: 基模截止波长 λ_f 跟结构参量 q 和 f 的关系与 λ_h 跟 q 和 f 的关系类似. 另外, 当结构参量 q 较小时, 基模截止波长有可能处于 C 或 L 波段, 因而, 不宜选取 q 较小的 EDHALF 制作光纤放大器.

4.3. 孔对模场直径的影响

把结构参量 R_c 和 Δ 分别固定为 $2.2 \mu\text{m}$ 和 0.01 , 利用 (13) 式数值计算了不同 q 和 f 组合的

EDHALF 在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处的模场直径, 从而得到了模场直径 ω 在 q - f 平面上的等高线, 如图 6 所示. 从图中看出: 当相对孔芯距 q 变小时, 模场直径也随之减小; 当孔的相对大小 $f > 0.3$ 时, 模场直径随着结构参量 f 的增大而缓慢的减小. 结构参量为 $R_c = 2.2 \mu\text{m}$, $\Delta = 0.01$ 的普通掺铒光纤在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处的模场直径大约为 $8.3 \mu\text{m}$. 看出: EDHALF 的模场直径值远小于普通光纤的.

从以上分析可以看出: 当孔的相对大小较小和

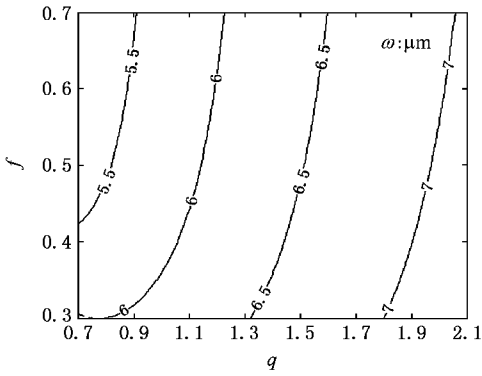


图6 EDHALF的模场直径在 q - f 平面上的等高线

相对孔芯距较大时,EDHALF的特性逐渐趋于普通掺铒光纤的特性;但当孔的相对大小较大($f > 0.3$)时,EDHALF的截止波长、模场直径和放大器的增益最大值基本上不再随着孔的相对大小的增大而改变。

5. 结构参数的优化设计

在优化设计EDHALF的四个结构参量时,应综合考虑掺铒光纤的截止波长,放大器的增益和噪声系数和熔接损耗等。优化的基本原则如下:

1) 在抽运和信号波长处于单模工作状态,若使用980 nm的抽运源,则二阶模截止波长应小于0.98 μm 。通常掺铒光纤的二阶模截止波长在0.92 $\mu\text{m} \pm 0.05 \mu\text{m}$ 。

2) 基模在信号波长处不被截止,通常基模截止波长应至少大于信号波长0.1 μm 。因而,制作C波段放大器的EDHALF的基模截止波长应大于1.66 μm ,而制作L波段放大器的EDHALF的基模截止波长应大于1.71 μm 。

3) 使用尽可能短的掺铒光纤得到符合要求的增益和噪声系数。

4) 在信号波长处的模场直径大小适中,通常,掺铒光纤在波长1.55 μm 处的模场直径为6—8 μm 。若模场直径过小,EDHALF与普通单模光纤的熔接损耗过大,从而影响放大器的输出性能。

从第4节知:当结构参量 f 大于0.3时,EDHALF的特性基本上不再随着 f 的增大而显著的变化。因而,不必优化结构参量 f ,不妨取 $f=0.4$ 。

首先,确定同时满足原则1)和2)的结构参量的值。为此,把结构参量 q 和 f 分别固定为0.4和0.4,

数值计算了不同 R_c 和 Δ 组合的EDHALF的二阶模和基模的截止波长,从而得到 $q=0.4, f=0.4$ 的EDHALF的截止波长 λ_h 和 λ_f 在 R_c - Δ 平面上的等高线,分别如图7(a)中的实线和点划线所示。类似地,计算了 $q=0.6, 0.8$ 和1.5的EDHALF的截止波长 λ_h 和 λ_f 在 R_c - Δ 平面上的等高线,分别如图7(b)(c)和(d)所示。根据原则(1)和(2)知:只有在 R_c - Δ 平面上,等高线 $\lambda_h=0.92 \mu\text{m}$ 位于等高线 $\lambda_f=1.66 \mu\text{m}$ 之上或两者重合的EDHALF才适合制作C波段光纤放大器。从图7看出:当 $q=0.4$ 时,线 $\lambda_h=0.92 \mu\text{m}$ 位于线 $\lambda_f=1.66 \mu\text{m}$ 之下;当 $q=0.6$ 时,线 $\lambda_h=0.92 \mu\text{m}$ 和线 $\lambda_f=1.66 \mu\text{m}$ 几乎重合;当 $q=0.8$ 或1.5时,线 $\lambda_h=0.92 \mu\text{m}$ 位于线 $\lambda_f=1.66 \mu\text{m}$ 之上。由此可见,需选 $q \geq 0.6$ 的EDHALF制作C波段放大器。同理,只有在 R_c - Δ 平面上,线 $\lambda_h=0.92 \mu\text{m}$ 位于线 $\lambda_f=1.71 \mu\text{m}$ 之上或两者重合的EDHALF才适合制作L波段放大器,因而,应选用 $q \geq 0.8$ 的EDHALF制作L波段放大器。

研究在满足前两条原则的前提下结构参量对放大器的增益和噪声系数的影响。从图7(b)看出:当结构参量 q 和 f 分别固定为0.6和0.4时,结构参量 R_c, Δ 组合为 $R_c=1.8 \mu\text{m}, \Delta=1.62 \times 10^{-2}$; $R_c=2.2 \mu\text{m}, \Delta=1.09 \times 10^{-2}$; $R_c=2.6 \mu\text{m}, \Delta=7.9 \times 10^{-3}$; $R_c=3.0 \mu\text{m}, \Delta=5.9 \times 10^{-2}$ 和 $R_c=3.4 \mu\text{m}, \Delta=4.6 \times 10^{-2}$ 的EDHALF的二阶模截止波长均为0.92 μm ;从图7(d)看出:当 $q=1.5, f=0.4$ 时, R_c, Δ 组合为 $R_c=1.8 \mu\text{m}, \Delta=1.43 \times 10^{-2}$; $R_c=2.2 \mu\text{m}, \Delta=9.6 \times 10^{-3}$; $R_c=2.6 \mu\text{m}, \Delta=6.9 \times 10^{-3}$; $R_c=3.0 \mu\text{m}, \Delta=5.2 \times 10^{-3}$ 和 $R_c=3.4 \mu\text{m}, \Delta=4.0 \times 10^{-3}$ 的EDHALF的二阶模截止波长也均为0.92 μm 。数值计算以上结构参量组合的EDHALF放大器的增益和噪声系数,分别如图8和图9所示。计算中所用的参数为: $P_p(0)=50 \text{ mW}, \lambda_p=0.98 \mu\text{m}, P_s(0)=-30 \text{ dBm}, \lambda_s=1.55 \mu\text{m}, N_i=5 \times 10^{24} \text{ ions/m}^3$ 。

比较小信号增益系数 G 满足指标要求(如 $G=31 \text{ dB}$)时,所需掺铒光纤的长度 $L(G=31 \text{ dB})$ 和此时的噪声系数 $NF(G=31 \text{ dB})$ 。从图8(a)看出:当结构参量 $q=0.6$ 时,不同的 $R_c=1.8, 2.2, 2.6, 3.0, 3.4 \mu\text{m}$ 的EDHALF放大器所需的 $L(G=31 \text{ dB})$ 值分别为7.6, 7.8, 8.1, 8.6和10.0 m,此时的噪声系数 $NF(G=31 \text{ dB})$ 分别为3.6, 3.7, 3.7, 3.8和3.9 dB。当 $q=1.5$ 时,不同的 $R_c=1.8, 2.2, 2.6, 3.0 \mu\text{m}$ 的

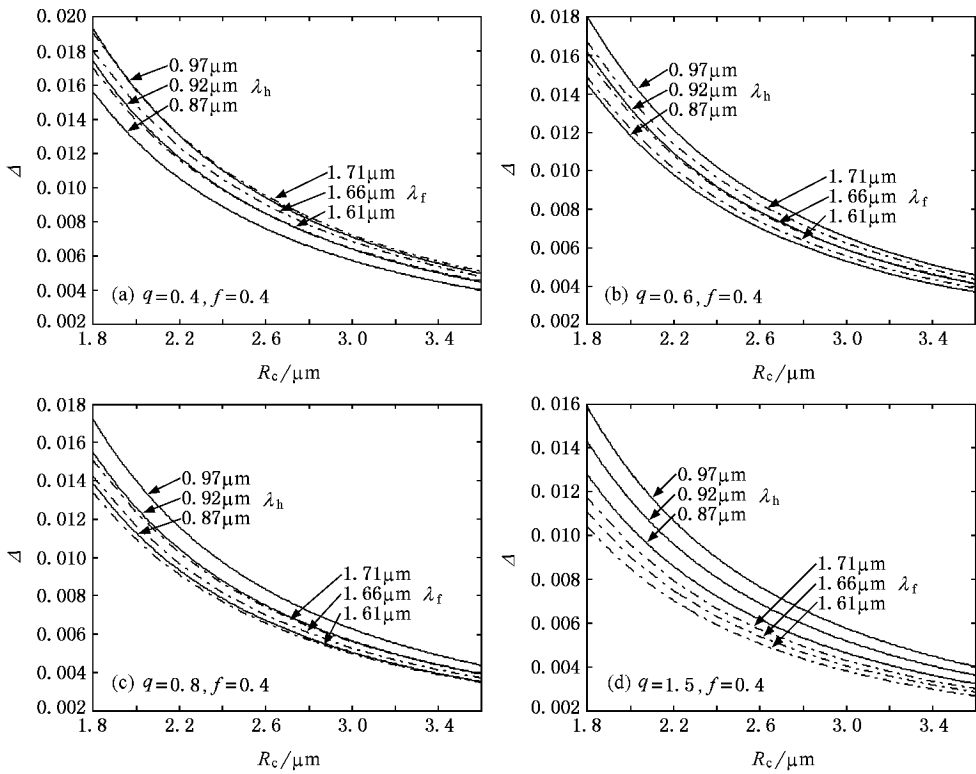


图 7 EDHALF 的截止波长在 R_c - Δ 平面上的等高线

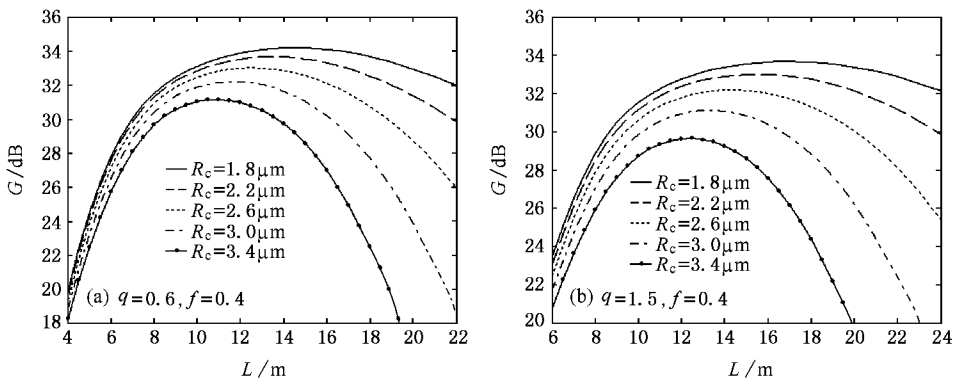


图 8 EDHALF 放大器的增益系数随光纤长度的变化曲线

EDHALF 放大器所需的 $L(G = 31 \text{ dB})$ 值分别为 9.4, 9.8, 10.5 和 12.2 m; 此时的噪声系数 $NF(G = 31 \text{ dB})$ 分别为 3.6, 3.6, 3.7 和 3.8 dB. 比较看出: 减小结构参量 q 的值, 可以显著的减小放大器所需的掺铒光纤长度. 根据第三条原则, 结构参量 q 越小越好. 因而, 制作 C 波段放大器的 EDHALF 的结构参量 q 宜选 0.6.

为了比较 EDHALF 和普通掺铒光纤放大器的 $L(G = 31 \text{ dB})$ 值, 数值计算了不同结构参量的普通掺铒光纤放大器的增益和噪声系数, 分别如图 10

(a) 和 (b) 所示, 所选的结构参量均使光纤的二阶模截止波长为 $0.92 \mu\text{m}$, 分别为 $R_c = 1.4 \mu\text{m}, \Delta = 2.17 \times 10^{-2}$; $R_c = 1.8 \mu\text{m}, \Delta = 1.32 \times 10^{-2}$; $R_c = 2.2 \mu\text{m}, \Delta = 8.8 \times 10^{-3}$ 和 $R_c = 2.6 \mu\text{m}, \Delta = 6.3 \times 10^{-3}$. 从图 10 看出, 不同 $R_c = 1.4, 1.8, 2.2, 2.6 \mu\text{m}$ 的普通掺铒放大器的所需的 $L(G = 31 \text{ dB})$ 值分别为 11.5, 11.8, 12.6 和 14.5 m; 它们所对应的 $NF(G = 31 \text{ dB})$ 均为 3.6 dB 左右. 比较 $q = 0.6$ 的 EDHALF 和普通掺铒光纤放大器的 $L(G = 31 \text{ dB})$ 值, 可以看出: EDHALF 放大器所需的 $L(G = 31 \text{ dB})$ 值远小于普通掺铒光纤

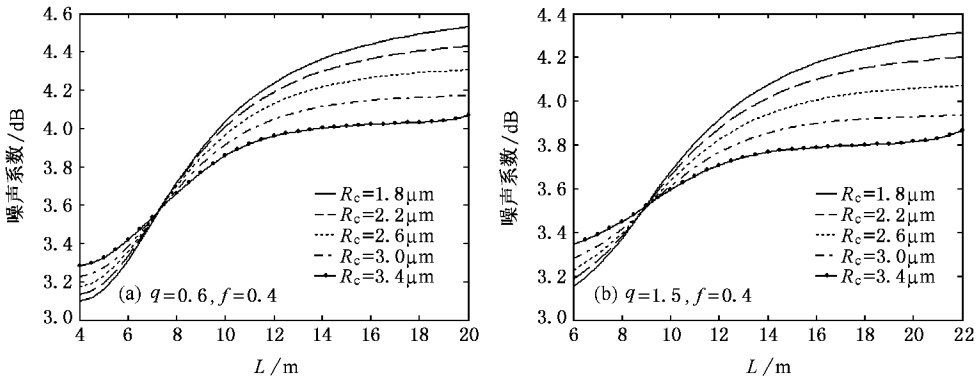


图 9 EDHALF 放大器的噪声系数随光纤长度的变化曲线

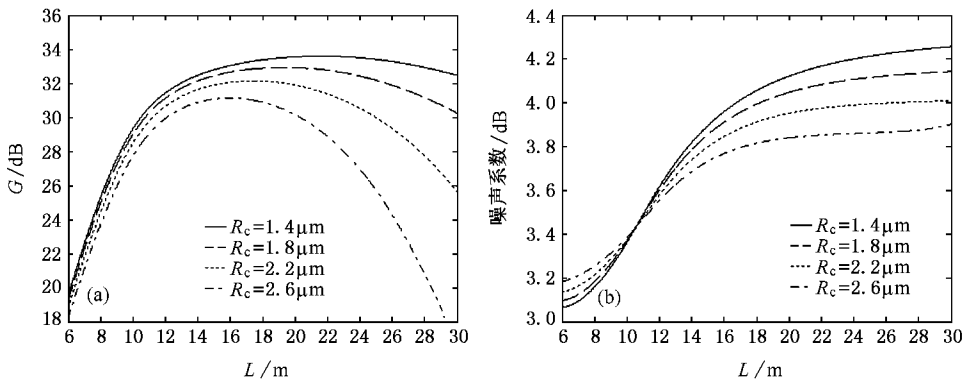


图 10 普通掺铒光纤放大器的增益 (a) 和噪声系数 (b) 随光纤长度的变化曲线

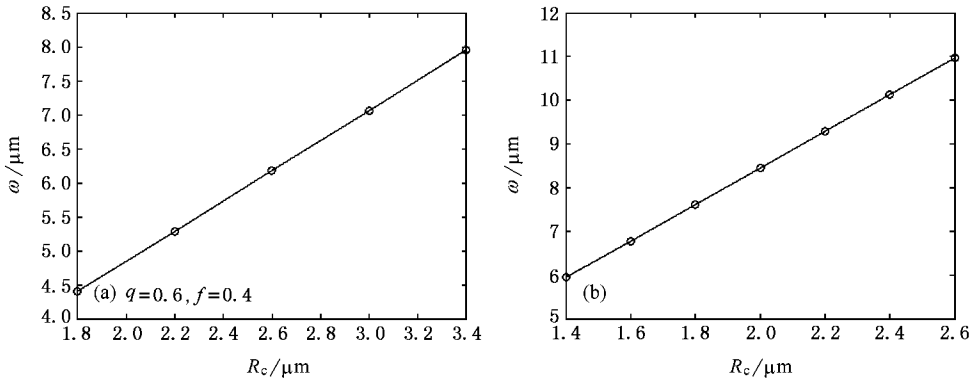


图 11 EDHALF (a) 和普通掺铒光纤 (b) 的模场直径随纤芯半径的变化曲线

放大器的,而相应的噪声系数也相差不大,这就是 EDHALF 的优势之一。

在实际制作光纤放大器时,还需要考虑掺铒光纤与普通单模光纤的熔接损耗,即需要考虑原则(4)。利用(13)式数值计算了以上所选的 $q=0.6, f=0.4$ 的 EDHALF 和普通掺铒光纤在波长 1.55 μm 处的模场直径,分别如图 11(a)和(b)所示。普通单

模光纤(如 Corning 的 SMF-28)在波长 1.55 μm 处的模场直径大约为 10 μm 。利用(14)式,可以简单的估计掺铒光纤与 SMF-28 的熔接损耗 α_{sp} 。

由于 $L(G = G_r + \alpha_{sp})$ 综合考虑了原则(3)和(4),为此,研究不同 R_c 和 Δ 组合对 $q=0.6, f=0.4$ EDHALF 放大器的 $L(G = 30 \text{ dB} + \alpha_{sp})$ 值的影响,从而优化 R_c 和 Δ 的值。从图 11(a)和(14)式知:当纤

芯半径 R_c 从 $1.8 \mu\text{m}$ 增大到 $3.4 \mu\text{m}$ 时, 熔接损耗 α_{sp} 从 2.7 dB 降至 0.2 dB ; 但从图 8(a) 可知, 增大 R_c , $L(G = G_r)$ 值也随之增大. 因而, R_c 存在优化值. 从图 8 和图 11 得到: 当 $q = 0.6$, $f = 0.4$ 时, 不同的 $R_c = 1.8, 2.2, 2.6, 3.0, 3.4 \mu\text{m}$ 的 EDHALF 放大器所需的 $L(G = 30 \text{ dB} + \alpha_{\text{sp}})$ 值分别为 $9.3, 8.3, 8.0, 8.1$ 和 8.6 m . 看出: 当 R_c 在 $2.2\text{—}3.0 \mu\text{m}$ 时, $L(G = 30 \text{ dB} + \alpha_{\text{sp}})$ 较小. 为此, 详细的计算了 R_c 处于 $2.2\text{—}3.0 \mu\text{m}$ 时, $L(G = 30 \text{ dB} + \alpha_{\text{sp}})$ 与 R_c 的关系; 发现当 R_c 在 $2.6\text{—}2.8 \mu\text{m}$ 时, $L(G = 30 \text{ dB} + \alpha_{\text{sp}})$ 值最小.

综上所述, EDHALF 的四个结构参量的优化值分别为: 纤芯半径 R_c 宜取 $2.6\text{—}2.8 \mu\text{m}$, 折射率差 Δ 取 $7.9 \times 10^{-3}\text{—}6.8 \times 10^{-3}$, 相对孔芯距 q 取 0.6 , 孔的相对大小应大于 0.3 .

同时, 还计算了普通掺铒光纤放大器的 $L(G = 30 \text{ dB} + \alpha_{\text{sp}})$ 值. 不同 $R_c = 1.4, 1.8, 2.2, 2.6 \mu\text{m}$ 的普通掺铒放大器的 $L(G = 30 \text{ dB} + \alpha_{\text{sp}})$ 值分别为 $11.6, 11.1, 11.3$ 和 12.2 m . 看出: 普通掺铒光纤的结构参量的优化值为: 纤芯半径 R_c 取 $1.8 \mu\text{m}$ 左右, 折射率差 Δ 取 1.32×10^{-2} 左右. 比较 EDHALF 和普通掺铒光纤的结构参量的优化值, 看出: EDHALF 的 Δ 值远小于普通掺铒光纤的, 因而, 可以大大减小纤芯 GeO_2 的掺杂量, 有利于降低掺铒光纤的背景损耗.

6. 结 论

空气孔的存在使得 EDHALF 和普通掺铒光纤的特性有着明显的区别. 本文详细的给出了研究

EDHALF 各种特性的数值计算方法: 采用有限法分析 EDHALF 的模式特性, 从而得到模式的电磁场强度和有效折射率, 给出了数值计算 EDHALF 截止波长和模场直径的方法; 提出改进的平均粒子数反转迭代算法来模拟计算掺铒光纤放大器的增益和噪声系数. 此算法能考虑功率流的横截面特性, 其核心就是把掺铒区域沿纵向沿横截面均分, 分割成一个个圆环体, 认为每个圆环体内各能级上的粒子数密度为常数; 成立的前提条件就是基模的纵向功率流密度在掺铒区域的等高线为圆形.

利用上述方法研究空气孔对 EDHALF 的截止波长、模场直径和所制作的放大器的增益系数的影响. 发现: 减小相对孔芯距, 可使基模和二阶模的截止波长向短波长移动, 减小模场直径的值; 当空气孔的相对大小较大时, 截止波长、模场直径和增益的最大值基本上不随着孔的相对大小的增大而变化. 最后, 根据掺铒光纤的设计原则, 优化设计了 EDHALF 的四个结构参量. 设计原则综合考虑了掺铒光纤的基模和二阶模的截止波长、放大器的增益和噪声系数和与普通单模光纤的熔接损耗等. 制作 C 波段光纤放大器的 EDHALF 的结构参量的优化值为: 纤芯半径取 $2.6\text{—}2.8 \mu\text{m}$, 折射率差 Δ 取 $7.9 \times 10^{-3}\text{—}6.8 \times 10^{-3}$, 相对孔芯距 q 取 0.6 , 孔的相对大小应大于 0.3 . 同时, 还比较了 EDHALF 和普通掺铒光纤放大器的特性, 发现: EDHALF 放大器所需掺铒光纤的长度远小于普通掺铒光纤放大器的; EDHALF 的纤芯与包层的折射率差的优化值远小于普通掺铒光纤的.

[1] Hasegawa T, Sasaoka E, Onishi M, Nishimura M, Tsuji Y, Koshiba M 2001 *Opt. Express* **9** 681
 [2] Prudenzano F 2005 *J. Lightwave Technol.* **23** 330
 [3] D'Orazio A, De Sario M, Mescia L, Petruzzelli V, Prudenzano F 2005 *Opt. Express* **13** 9970
 [4] Giles C R, Desurvire E 1991 *J. Lightwave Technol.* **9** 271
 [5] Vermelho MVD, Peschel U, Aitchison J S 2000 *J. Lightwave Technol.* **18** 401
 [6] Koshiba M 2002 *IEICE Trans. Electron.* **E85-C** 881
 [7] Zhu Z M, Brown T G 2002 *Opt. Commun.* **206** 333

[8] Yu Q, Cui J C, Wang S H, Liu X M, Fan C C 1999 *Chinese J. Lasers* **26** 585 (in Chinese) [俞 谦, 崔景翠, 王四海, 刘小明, 范崇澄 1999 中国激光 **26** 585]
 [9] Ren G B, Wang Z, Lou S Q, Jian S S 2004 *Acta Opt. Sin.* **24** 1477 (in Chinese) [任国斌, 王 智, 娄淑琴, 简水生 2004 光学学报 **24** 1477]
 [10] Yan M, Shum P, Lu C 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 123
 [11] Koshiba M, Saitoh K 2003 *Opt. Express* **11** 1746
 [12] Saitoh K, Koshiba M 2005 *J. Lightwave Technol.* **23** 3580

Erbium-doped hole-assisted lightguide fiber : structural study and optimization *

Zheng Kai[†] Chang De-Yuan Fu Yong-Jun Wei Huai Yan Feng-Ping Jian Wei Jian Shui-Sheng

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

(Received 30 April 2006 ; revised manuscript received 19 June 2006)

Abstract

Erbium-doped hole-assisted lightguide fiber (EDHALF) is composed of a high-index core doped with erbium , a low index cladding and a small number of air holes surrounding the core . The finite element method is applied for solving the modal field of the EDHALF . The numerical calculation methods of the cutoff wavelength and mode field diameter are described in detail . The modified average population inversion iteration method is proposed for calculating the gain and noise figure of erbium-doped fiber amplifiers . The effects of the air holes on EDHALFs ' cutoff wavelengths , mode field diameters and the gain coefficients of fiber amplifiers are studied . It ' s found that decreasing the relative hole-to-core spacing can make the cutoff wavelength move to shorter wavelength and decrease the mode field diameter . When the relative size of air holes is relatively large , further enlarging it only slightly changes the cutoff wavelength , mode field diameter and the maximum of the gain coefficient . Finally , four structural parameters , namely the EDHALF-core radius , the refractive index difference between the core and cladding , the relative hole-to-core spacing and the relative size of air holes are optimized in terms of the design criteria , which take into account the cutoff wavelengths of fundamental mode and the second order mode , the gain and noise figure of fiber amplifiers and the splice loss between the EDHALF and the conventional single-mode fiber .

Keywords : hole-assisted lightguide fiber , erbium-doped fiber , fiber amplifier , finite element method

PACC : 4281 , 4255N

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant Nos. 2002AA312190 , 2004AA31g200) .

[†] E-mail : pkaizheng@163.com