

光纤放大器放大自发辐射特性与高温易损点位置

罗亿 王小林 张汉伟 粟荣涛 马鹏飞 周朴 姜宗福

Amplified spontaneous emission characteristics and locations of high temperature vulnerable point in fiber amplifiers

Luo Yi Wang Xiao-Lin Zhang Han-Wei Su Rong-Tao Ma Peng-Fei Zhou Pu Jiang Zong-Fu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 234206 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.234206

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.234206>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I23>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种基于金刚石多层波导结构微环谐振器的仿真分析

Simulation analysis of micro-ring resonator based on diamond multilayer waveguide structure

物理学报.2017, 66(20): 204203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.204203>

外腔共振和频系统中阻抗匹配的理论研究

Theoretical investigation of impedance matching in the process of sum-frequency generation in an external resonator

物理学报.2016, 65(4): 044207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.044207>

面向谐振式微光学陀螺应用的球形谐振腔 DQ 乘积优化

Optimization of microsphere's DQ product based on resonant micro-optical gyro

物理学报.2015, 64(15): 154206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154206>

基于新型三环谐振器的诱导透明效应分析

Analysis of induced-transparency in an original three-order resonator system

物理学报.2015, 64(14): 144202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.144202>

温度测量范围加倍的单微环传感器

Doubled temperature measurement range for a single micro-ring sensor

物理学报.2014, 63(15): 154209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.154209>

光纤放大器放大自发辐射特性与高温易损点位置*

罗亿 王小林[†] 张汉伟 栗荣涛 马鹏飞 周朴 姜宗福[‡]

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 高能激光技术湖南省重点实验室, 大功率光纤激光湖南省协同创新中心, 长沙 410073)

(2016年12月27日收到; 2017年7月18日收到修改稿)

在高功率光纤放大器实验中, 时常发现增益光纤抽运注入熔接点后10—50 cm处容易发生光纤烧毁现象. 为了对该现象进行理论预测, 基于光纤激光器速率方程模型和增益光纤的热传导模型, 从种子功率、抽运功率和抽运吸收三个方面对掺镱双包层光纤放大器中的放大自发辐射(ASE)和温度特性进行研究. 结果表明, 在放大倍率较高、ASE较为严重等情况下, 光纤放大器中的最高温度点一般不在抽运注入的熔接点处, 而在距离熔接点10—50 cm处, 与实验中发现光纤烧毁的位置基本符合. 从光纤放大器的ASE抑制、最高温度点温度控制角度出发, 对光纤放大器在种子功率、抽运功率、抽运吸收、放大倍率和抽运波长等方面的设计给出了指导性的建议.

关键词: 光纤放大器, 放大自发辐射, 温度特性

PACS: 42.60.Da, 42.55.Wd, 42.55.Xi

DOI: 10.7498/aps.66.234206

1 引言

Yb^{3+} 离子能级结构简单、量子效率高、无激发态吸收和浓度淬灭, 成为目前高功率激光放大的首选^[1,2]. 掺 Yb^{3+} 双包层光纤放大器由于具有结构简单、空间光束质量好、转换效率高以及稳定性高等优点受到越来越多的关注. 在掺 Yb^{3+} 双包层光纤放大器中, 为了获得高功率的激光输出, 一般采用主振荡功率放大(MOPA)结构, 在该过程中产生的放大自发辐射(ASE)将被逐级放大, 由于存在光纤端面反射, 容易诱发寄生振荡, 损坏器件, 甚至烧毁放大器, 故ASE成为限制放大器功率提升的主要因素^[3,4]. 在高功率光纤放大器中, 由于掺 Yb^{3+} 双包层光纤的特殊波导结构, 导致激光能量被束缚在微米量级的纤芯中, 随着激光功率的增长, 光纤中的热效应会越来越严重, 导致纤芯温度急剧升高, 造成增益光纤的热损坏, 影响输出光束质量, 严重限制了激光功率的进一步提升^[5-8]. 在实际的高功率光纤放大器实验中, 时常发现增益光纤抽运注

入熔接点后10—50 cm处容易发生光纤烧毁的现象. 由于种子功率、抽运功率和抽运吸收等因素会影响光纤中的ASE和温度特性, 因此为了对实际实验中放大器的最高温度和易损点位置进行理论预判, 根据速率方程理论和热传导理论, 研究了种子功率、抽运功率和抽运吸收对ASE和温度特性的影响, 对不同抽运波长下ASE在总功率中所占的比例、最高温度点在光纤中的位置、最高温度与抽运注入熔接点的温差比例进行了分析. 根据仿真结果, 从光纤放大器的ASE抑制、最高温度点温度控制角度出发, 对光纤放大器在种子功率、抽运功率、抽运吸收、放大倍率和抽运波长等方面的设计给出了指导性的建议, 为放大器设计提供参考, 为故障判断提供依据.

2 实验基本现象与理论模型

2.1 实验基本现象

在光纤放大器实验中, 在没有后向布里渊散射、熔点瑕疵和输出端帽损伤的情况下, 经常发现

* 国家自然科学基金(批准号: 61505260, 61735007)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: chinawxllin@163.com

[‡] 通信作者. E-mail: jiangzongfu7@163.com

光纤放大器会在距离抽运注入端的10—50 cm处烧毁. 表1给出了两个实验的基本状态和损伤位置. 对多个类似的实验进行统计, 发现类似光纤烧毁的情况下, 损伤点都在距离抽运注入增益光纤熔点的10—50 cm左右. 为了对实验现象进行定性分析, 便于对实验提供指导, 建立了相关的理论模型,

表1 不同实验中光纤的损伤位置

Table 1. Damage location of fiber with different experiments

抽运源 /nm	光纤纤芯 直径/ μm	光纤内包层 直径/ μm	种子 功率/W	输出 功率/W	损伤 位置/cm
976	20	400	20	1200	~ 22
915	30	400	50	3150	~ 50

$$\frac{dP_p^+(z)}{dz} = \Gamma_p[(\sigma_{ep} + \sigma_{ap})N_2(z) - \sigma_{ap}N_0(z)]P_p^+(z) - \alpha_p P_p^+(z), \quad (1)$$

$$\frac{dP_p^-(z)}{dz} = -\Gamma_p[(\sigma_{ep} + \sigma_{ap})N_2(z) - \sigma_{ap}N_0(z)]P_p^-(z) + \alpha_p P_p^-(z), \quad (2)$$

$$\frac{dP_s^+(z)}{dz} = \Gamma_s[(\sigma_{es} + \sigma_{as})N_2(z) - \sigma_{as}N_0(z)]P_s^+(z) - \alpha_s P_s^+(z) + \Gamma_s \sigma_{es} N_2(z) P_s^0, \quad (3)$$

$$\frac{dP_s^-(z)}{dz} = -\Gamma_s[(\sigma_{es} + \sigma_{as})N_2(z) - \sigma_{as}N_0(z)]P_s^-(z) + \alpha_s P_s^-(z) - \Gamma_s \sigma_{es} N_2(z) P_s^0, \quad (4)$$

$$\frac{N_2(z)}{N_0(z)} = \frac{\Gamma_p \sigma_{ap} [P_p^+(z) + P_p^-(z)] \lambda_p + \Gamma_s \sigma_{as} [P_s^+(z) + P_s^-(z)] \lambda_s}{\Gamma_p [P_p^+(z) + P_p^-(z)] (\sigma_{ep} + \sigma_{ap}) \lambda_p + \Gamma_s [P_s^+(z) + P_s^-(z)] (\sigma_{es} + \sigma_{as}) \lambda_s + \frac{hcA_{\text{eff}}}{\tau}}, \quad (5)$$

$$N_0(z) = N_1(z) + N_2(z), \quad (6)$$

其中 P_s^0 为自发辐射对激光功率的贡献,

$$P_s^0 = 2 \frac{hc^2}{\lambda_s^3} \Delta\lambda_s, \quad (7)$$

式中 $c = 2.99792458 \times 10^8$ m/s 为光速; $h = 6.62606896 \times 10^{-34}$ J/s 为普朗克常数; $N_0(z)$ 为总的掺杂离子浓度; $N_2(z)$ 为激发态掺杂离子浓度; Γ_p, Γ_s 分别为抽运光和信号光的光场模式与掺杂离子区域的填充因子, 对于双包层增益光纤而言, 抽运填充因子近似等于增益光纤的纤芯和内包层的面积比, 即 $\Gamma_p = \text{纤芯面积}/\text{内包层面积}$, 信号填充因子与增益光纤的纤芯直径有关, 为了简化模型, 通常取只传输基模时的数值, 约为1; P_p^+, P_p^- 分别为抽运光在增益光纤中传输的正、反向功率; P_s^+, P_s^- 分别为信号光在增益光纤中传输的正、反向功率; λ_p, λ_s 分别为抽运光、信号光的波长; σ_{ap}, σ_{ep} 分别为抽运光的吸收和发射截面; σ_{as}, σ_{es} 分别为信号光的吸收和发射截面; α_p, α_s 分别代表抽运光、

对放大器中的 ASE 和纤芯温度等特性进行了理论研究. 基于后向抽运合束器的制作难度大, 价格昂贵, 以及前向抽运有实验结果可以参照等原因, 本文仅仿真分析了前向抽运条件下放大器中的 ASE 和纤芯温度等特性.

2.2 理论模型

2.2.1 速率方程理论模型

在稳态条件下, 不考虑非线性效应时, 根据 Yb^{3+} 离子的二能级简化结构和激光在光纤中的传输特性, 连续光纤激光器的速率方程组可以简化为^[9-11]:

信号光的衰减系数; τ 为 Yb^{3+} 离子的上能级寿命, 约为 850 μs ; A_{eff} 为有效模式面积:

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left(\iint |E|^2 dx dy\right)^2}{\iint |E|^4 dx dy} = \frac{\left(\iint I(x, y) dx dy\right)^2}{\iint I^2(x, y) dx dy}. \quad (8)$$

(1) 式和 (2) 式分别描述了前向和后向抽运光在空间上的光功率微分增量, 包括粒子对抽运光的吸收与发射以及抽运光自身的传输衰减. (3) 式和 (4) 式分别描述了前向和后向信号光在空间上的光功率微分增量, 包括粒子对信号光的吸收与发射、信号光自身的传输衰减以及信号光中各波长带宽内 ($\Delta\lambda_s$) 的自发辐射. (5) 式描述了增益光纤中的上能级粒子数在总粒子数中所占的比例, 与抽运光和信号光的吸收、发射以及有效模式面积和 Yb^{3+}

离子的上能级寿命有关. (6) 式表示粒子总数守恒.

在前向抽运的光纤放大器中, 边界条件为:

$$P_p^+(0) = P_p^{\text{in}}, \quad (9)$$

$$P_p^-(L) = 0, \quad (10)$$

$$P_s^+(0) = P_s^{\text{in}}, \quad (11)$$

$$P_s^-(L) = 0, \quad (12)$$

式中 P_p^{in} , P_s^{in} 分别为输入抽运功率和信号功率, L 为增益光纤长度.

在进行数值仿真时, 用差分迭代法即 $dP(z)/dz = [P(z + \Delta z) - P(z)]/\Delta z$, 求解上述偏微分方程组, 得到 $P(z + \Delta z)$ 的表达式, 根据边界条件, 代入初始条件, 不断迭代循环求解, 即可求得光纤放大器的输出功率.

2.2.2 增益光纤温度理论模型

双包层光纤主要由纤芯(I区)、内包层(II区)、外包层及涂覆层(III区)组成, 半径分别为 r_1 , r_2 和 r_3 , 结构如图 1 所示.

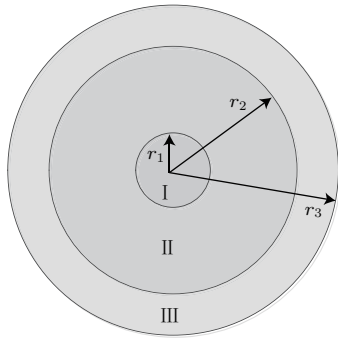


图 1 双包层光纤结构图

Fig. 1. Structure diagram of the double-cladding fiber.

由于掺 Yb^{3+} 双包层光纤的径向温度变化不大, 而轴向温度变化明显, 因此只考虑纤芯温度沿光纤轴向的分布^[12]. 根据热传导方程和边界条件, 得到各部分的温度. 纤芯区温度 T_1 、内包层区温度 T_2 、外包层区温度 T_3 分别为^[5]:

$$T_1(r, z) = T_0(z) - \frac{Q(z)r^2}{4\kappa_1}, \quad (13)$$

$$T_2(r, z) = T_0(z) - \frac{Q(z)r_1^2}{4\kappa_1} - \frac{Q(z)r_1^2}{2\kappa_2} \ln\left(\frac{r}{r_1}\right), \quad (14)$$

$$T_3(r, z) = T_0(z) - \frac{Q(z)r_1^2}{4\kappa_1} - \frac{Q(z)r_1^2}{2\kappa_2} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

$$- \frac{Q(z)r_1^2}{2\kappa_3} \ln\left(\frac{r}{r_2}\right), \quad (15)$$

其中 T_0 为纤芯温度^[13]:

$$\begin{aligned} T_0(0, z) &= T_c(r_3, z) + \frac{Q(z)r_1^2}{2hr_3} + \frac{Q(z)r_1^2}{4\kappa_1} \\ &+ \frac{Q(z)r_1^2}{2\kappa_2} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{Q(z)r_1^2}{2\kappa_3} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right). \end{aligned} \quad (16)$$

一般情况下, 光纤内热源表达式可表示为^[14]

$$\begin{aligned} Q(r, z) &= \left[\frac{\lambda_s - \lambda_p}{\lambda_p} \right] [\sigma_p^a N_0(r, z) - (\sigma_p^e + \sigma_p^a) N_2(r, z, t)] \\ &\times \frac{P_p(r, z)}{A_p} + \alpha_s(r) I_s(r, z), \end{aligned} \quad (17)$$

式中 h 为对流/覆层材料的热传递系数; T_c 为环境制冷温度; r 为极坐标半径; κ_1 为纤芯导热系数; κ_2 为内包层导热系数; κ_3 为外包层导热系数; N_0 为总的掺杂离子浓度; N_2 为激发态掺杂离子浓度; λ_s , λ_p 分别为信号光和抽运光的波长, α_s 为信号光线性吸收系数, A_p 为包层面积; σ_p^a , σ_p^e 分别为抽运光吸收、发射截面; P_p 为抽运功率; I_s 为信号光功率密度. 将热源表达式 (17) 代入方程 (13)—(16) 中, 即可求得光纤中的温度分布.

3 数值仿真

根据第 2 节中的数学模型, 结合实际情况, 选择纤芯/包层直径为 20/400 μm 的掺 Yb^{3+} 双包层光纤进行数值仿真. 为了使模型更接近实际情况, 仿真中考虑了多波长抽运和多波长信号光输出. 仿真中用到的主要参数如表 2 所列 (表中只列出了抽运中心波长和信号中心波长的吸收发射截面, 其他波长的吸收发射截面对照图 2 中 Yb^{3+} 离子的吸收发射截面取得, 图 2 为室温下 Yb^{3+} 离子的吸收发射截面. 利用吸收发射截面随温度变化关系^[15], 计算了 293 K 和 353 K 情况下的吸收发射截面及光纤温度分布和光谱图, 结果表明本仿真中的温度变化对吸收发射截面、光纤最高温度点位置和温度值、ASE 均影响不大. 其他公开发表的文献中也给出了类似的结论^[16]. 因此为了简化模型, 忽略了温度变化引起的 Yb^{3+} 离子吸收发射截面的变化.

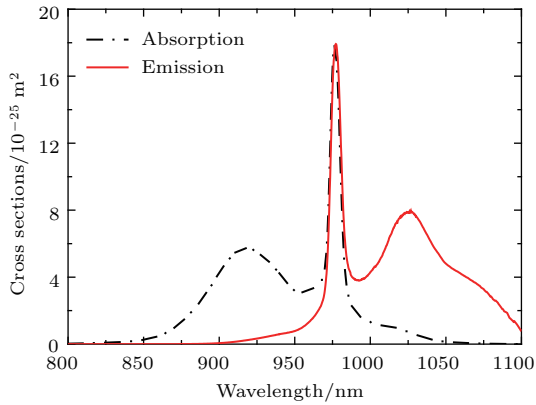


图2 Yb³⁺ 离子的吸收、发射截面

Fig. 2. Absorption and emission cross sections of Yb³⁺.

利用上述模型,对满足实验条件的参数进行仿真,得到增益光纤内部温度分布和输出光谱如图3所示.结果表明,放大器增益光纤内部温度最高点距离抽运注入熔接点45 cm左右,与实验状态下的位置基本符合,具体数值的差异是由于实际实验参数与理论仿真输入参数不完全一致导致的;输出激光中,ASE偏向长波长1080 nm波段,在高功率连续激光放大实验中,ASE的出现限制了激光功率的提升,降低了系统的信噪比.为了对这一现象进行深入分析,下面分别对不同抽运波长情况下的种子功率、抽运功率和抽运吸收对输出激光ASE特性和高温易损点的位置进行研究.

表2 仿真参数

Table 2. Parameters of the simulation.

参数名称	数值	参数名称	数值
抽运中心波长 (λ_p)	915 nm/975 nm	信号光衰减系数 (α_s)	0.005 m ⁻¹
抽运波长范围	910—920 nm/970—980 nm	抽运吸收截面 (σ_{ap})	5.69 × 10 ⁻²⁵ m ² /1.65 × 10 ⁻²⁴ m ²
信号中心波长 (λ_s)	1064 nm	抽运发射截面 (σ_{ep})	1.93 × 10 ⁻²⁶ m ² /1.52 × 10 ⁻²⁴ m ²
信号波长范围	1000—1100 nm	信号吸收截面 (σ_{as})	6.38 × 10 ⁻²⁷ m ²
信号填充因子 (Γ_s)	1	信号发射截面 (σ_{es})	3.98 × 10 ⁻²⁵ m ²
抽运填充因子 (Γ_p)	0.0025	上能级寿命 (τ)	8.5 × 10 ⁻⁴ s
抽运光衰减系数 (α_p)	0.003 m ⁻¹	有效模式面积 (A_{eff})	3.14 × 10 ⁻¹⁰ m ²
换热系数 (h)	1200 W/(m ² ·K)		

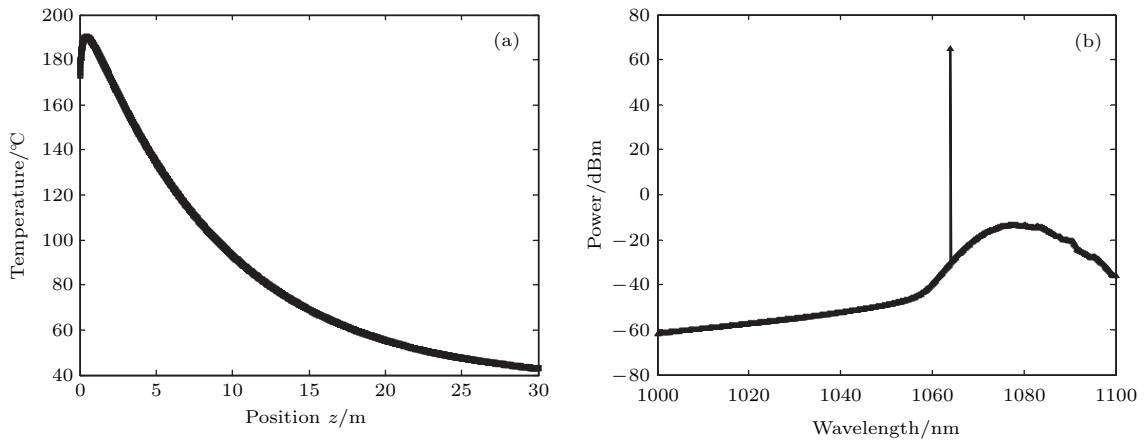


图3 915 nm 抽运的仿真结果 (a) 光纤内部温度分布; (b) 输出光谱

Fig. 3. Simulation results with 915 nm pumped: (a) Temperature distribution in fiber interior; (b) output spectrum.

3.1 种子功率对 ASE 和温度特性的影响

由于种子功率的增加会增强受激辐射,消耗更多的上能级粒子数^[17],从而降低 ASE 对能量的提取,同时也会产生更多的废热,导致光纤温度升高,

故种子功率的大小会影响 ASE 功率、放大器的稳定性和输出特性^[18]. 在高功率的光纤放大器中,为了提升输出功率,需要在抑制 ASE 的同时,对增益光纤中的热分布进行有效管理,因此有必要对增益光纤中的 ASE 和温度特性进行研究. 当种子功率

的范围为1—100 W、抽运功率为1000 W时, 分别对不同抽运波长下 ASE 在总功率中所占的比例、最高温度点在光纤中的位置、最高温度与抽运注入熔接点的温差比例进行了分析, 研究了种子功率对 ASE 和温度特性的影响.

ASE 在总功率中所占的比例如图 4 所示, 可以看出, ASE 在总输出功率中所占的比例都随种子功率的增加逐渐减小, 两种抽运波长下的变化曲线几乎相同, 只是数值不同, 数值的差异是由于增益光纤对两种抽运光吸收的强弱和增益光纤长度不同造成的. 在仿真中, 增益光纤对抽运光的总吸收系数为 15 dB, 由于增益光纤对 915 nm 的抽运光的吸收较弱 (即吸收系数较小), 所以 915 nm 抽运时增益光纤的长度更长, 导致 ASE 在总功率中所占的比例大于 975 nm 抽运时 ASE 在总功率中所占的比例. 不同种子功率下的 ASE 功率和输出功率如图 5 所示, 随着种子功率的增加, 两种抽运波长下的 ASE 功率都逐渐减小, 输出功率几乎都呈线性

增长; 在种子功率较小时, 系统放大倍率较高, ASE 较为严重; 在相同的种子功率下, 975 nm 抽运时的输出功率更高, ASE 功率更小, 因此 975 nm 抽运时光纤放大器的性能更佳. 结合图 4 和图 5 可知, 当种子功率超过 10 W 后, ASE 在总功率中所占的比例及 ASE 功率的下降趋势都逐渐减缓, 这是由于种子功率的提高增强了种子对增益光纤中储存能量的提取, 从而抑制了 ASE 的功率增长.

为了研究 ASE 在总功率中所占的比例随种子功率急剧变化的部分, 将种子功率限定在 10 W 以内, 仿真结果如图 6 所示. 由图 6 可以看出, 915 nm 和 975 nm 抽运, 当种子功率在 1 W 以内时, ASE 在总功率中所占的比例下降得比较迅速, 之后逐渐趋于平缓. 因此在实际实验中, 为了抑制 ASE, 种子功率应大于 10 W; 若种子功率较小, 应尽可能让其大于 1 W, 才能得到有效放大, 且放大倍率不宜太高, 否则 ASE 功率会迅速增长, 后向传输的 ASE 容易损坏前端器件.

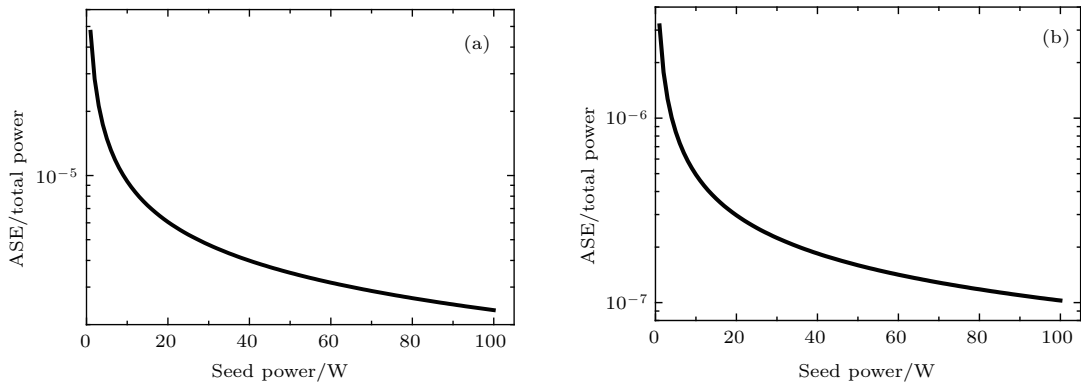


图 4 不同种子功率下 ASE 在总功率中所占的比例 (a) 915 nm 抽运; (b) 975 nm 抽运

Fig. 4. Ratio of ASE to total power with different seed power: (a) 915 nm pump; (b) 975 nm pump.

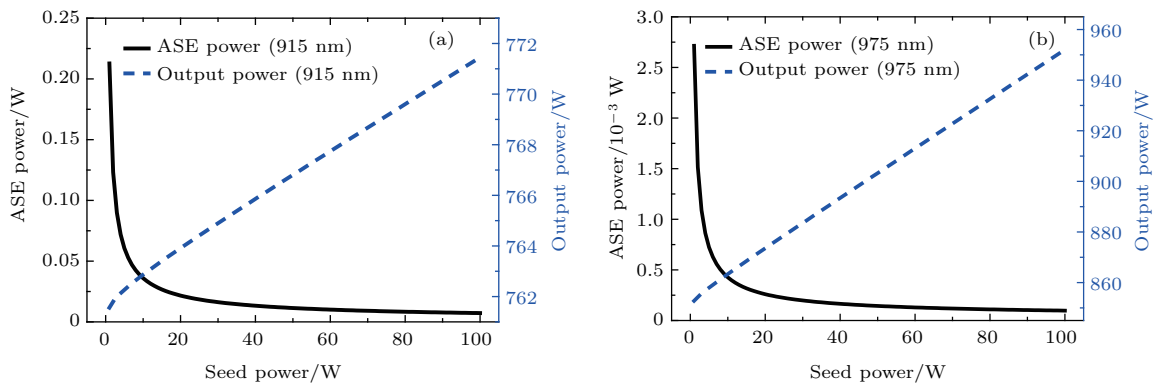


图 5 (网刊彩色) 不同种子功率下的 ASE 功率和输出功率 (a) 915 nm 抽运; (b) 975 nm 抽运

Fig. 5. (color online) ASE power and output power with different seed power: (a) 915 nm pump; (b) 975 nm pump.

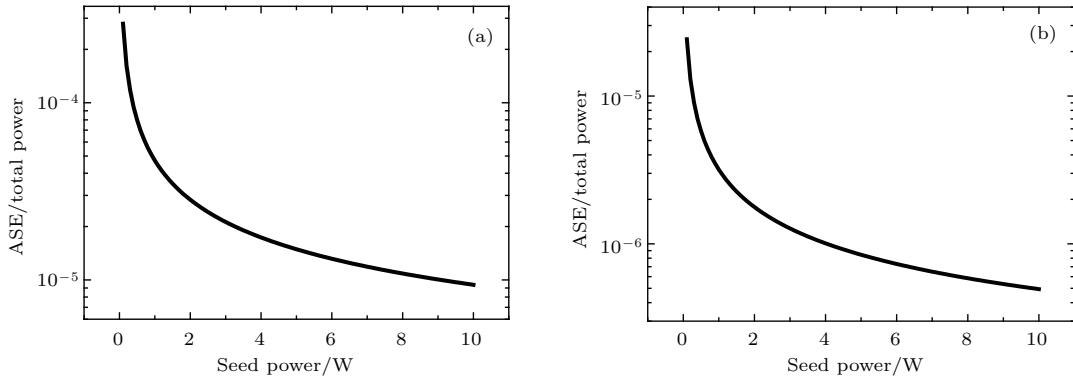


图6 不同种子功率下 ASE 在总功率中所占的比例 (a) 915 nm 抽运; (b) 975 nm 抽运

Fig. 6. Ratio of ASE to total power with different seed power: (a) 915 nm pump; (b) 975 nm pump.

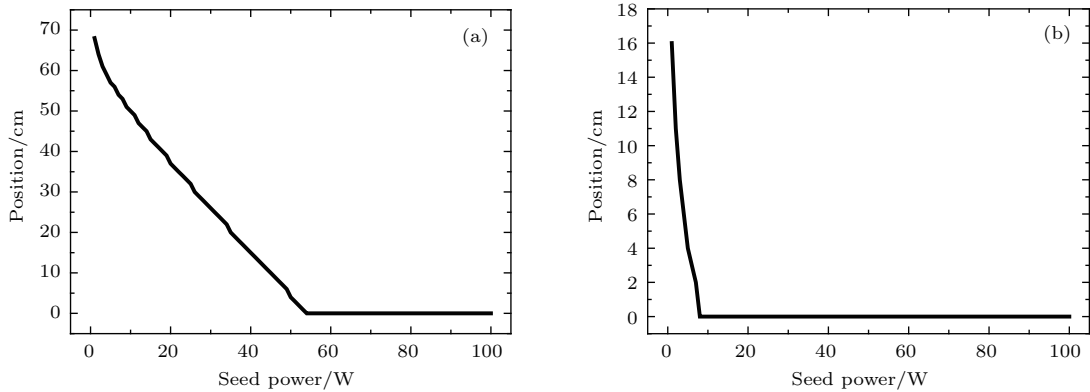


图7 不同种子功率下最高温度点在光纤中的位置 (a) 915 nm 抽运; (b) 975 nm 抽运

Fig. 7. Position of the maximum temperature point in the fiber with different seed power: (a) 915 nm pump; (b) 975 nm pump.

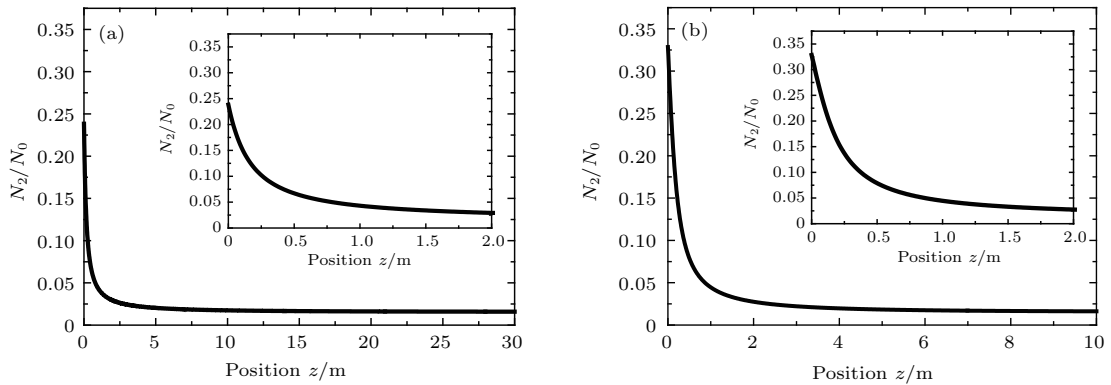


图8 上能级粒子数在增益光纤中的分布 (a) 915 nm 抽运; (b) 975 nm 抽运 (插图: 上能级粒子数在增益光纤 (2 m 内) 中的分布)

Fig. 8. Distribution of upper level population in gain fibers: (a) 915 nm pump; (b) 975 nm pump. Inset: the distribution of upper level population in gain fibers (within 2 meters).

最高温度点在光纤中的位置如图7所示, 可以看出, 在两种抽运波长下, 随着种子功率的增加, 纤芯最高温度点在光纤中的位置都逐渐接近于抽运注入熔接点. 这是由上能级粒子数在增益光纤中的分布和种子功率对光纤中储存能量的提取决定的. 在种子功率为 10 W、抽运功率为 1000 W 时, 上能

级粒子数沿增益光纤的分布如图8所示, 距离抽运端熔接点越近, 上能级粒子数越多, 种子功率可以提取的能量越多, 而且种子功率的增加可以增强受激辐射, 消耗更多的上能级粒子数, 进而产生更多废热, 故纤芯最高温度点随种子功率的增加逐渐接近抽运端熔接点. 915 nm 抽运时, 当种子功率超过

53 W 后, 纤芯最高温度点固定在抽运端熔接点处; 975 nm 抽运时, 当种子功率超过 8 W 后, 纤芯最高温度点固定在抽运端熔接点处. 两者之间的差异是由于增益光纤对 915 nm 和 975 nm 抽运光的吸收强弱不同和上能级粒子数的分布差异造成的. 由于增益光纤对 975 nm 的抽运光的吸收更强, 导致在增益光纤前端 (2 m 内) 的同一位置处 975 nm 抽运时的上能级粒子数更多, 如图 8 所示. 在相同的种子功率下, 975 nm 抽运时, 种子在增益光纤前端 (2 m 内) 的同一位置处可以提取更多的能量, 产生

更多热量, 故 975 nm 抽运时, 纤芯最高温度点随种子功率的增加更快地接近抽运端熔接点.

975 nm 抽运时, 由于种子功率超过 8 W 后, 最高温度点在光纤中的位置固定不变, 故将种子功率限定在 10 W 以内, 研究最高温度点在光纤中的位置随种子功率的变化. 仿真结果如图 9 所示, 可以看出, 915 nm 和 975 nm 抽运时, 最高温度点在光纤中的位置都随种子功率的增加而呈阶梯状逐渐接近于抽运注入熔接点, 受上能级粒子数的限制, 接近趋势逐渐减缓.

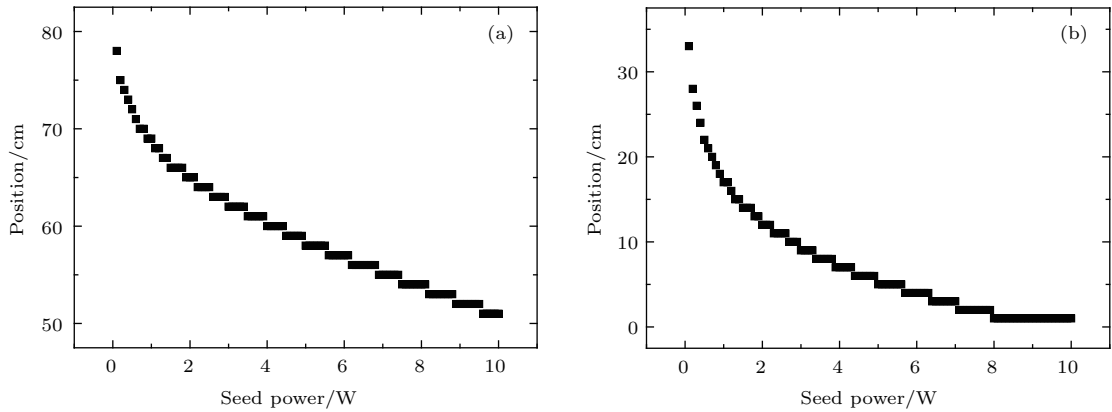


图 9 不同种子功率下最高温度点在光纤中的位置 (a) 915 nm 抽运; (b) 975 nm 抽运

Fig. 9. Position of the maximum temperature point in the fiber with different seed power: (a) 915 nm pump; (b) 975 nm pump.

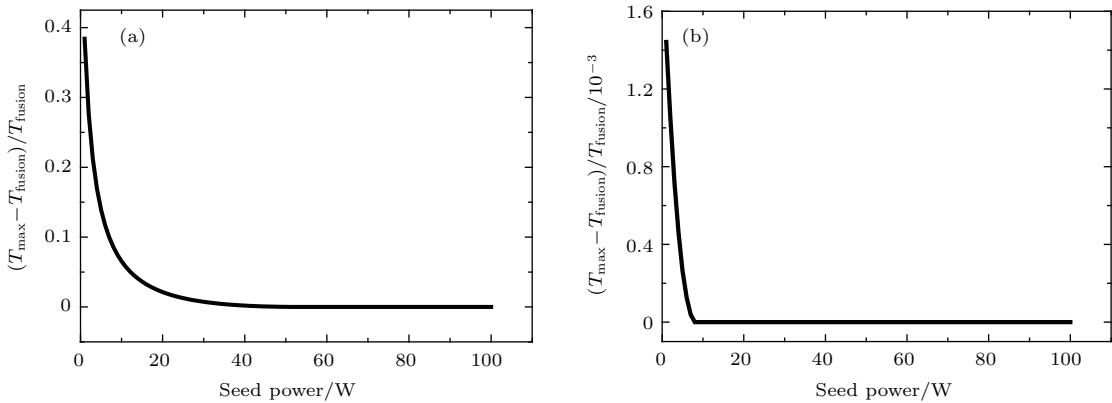


图 10 最高温度与熔接点的温差比例随种子功率的变化 (a) 915 nm 抽运; (b) 975 nm 抽运

Fig. 10. The temperature difference ratio between the maximum temperature and the fusion point with different seed power: (a) 915 nm pump; (b) 975 nm pump.

最高温度与抽运端熔接点的温差比例如图 10 所示, 由图可以看出, 在两种抽运波长下, 随着种子功率的增加, 最高温度与抽运端熔接点的温差比例都急剧下降, 最后趋于稳定. 915 nm 抽运时, 当种子功率超过 53 W 后, 其比例降为 0; 975 nm 抽运时, 当种子功率达到 8 W 后, 其比例降为 0, 说明此时熔接点的温度最高. 在实际实验中,

为了保证放大器稳定安全地运行, 最高温度与抽运端熔接点的温差比例一般应低于 10%, 由于 975 nm 抽运时, 最高温度与抽运端熔接点的温差比例远低于 10%, 故采用 975 nm 抽运在提高种子功率抑制 ASE 和提升输出功率方面更有优势.

为了研究最高温度与抽运端熔接点的温差比例随种子功率急剧变化的部分, 将种子功率限定

在 10 W 以内, 仿真结果如图 11 所示. 由图可以看出, 915 nm 抽运时, 最高温度与抽运端熔接点的温差比例随种子功率的增加呈下降趋势, 且下降趋势逐渐减缓. 在实际实验中, 为了保证放大器稳定安全地运行, 最高温度与抽运端熔接点的温差比例应低于 10%, 因此种子功率最好超过 7 W. 975 nm 抽运, 当种子功率低于 0.3 W 时, 最高温度与抽运端熔接点的温差比例随种子功率的增加而

增加, 这与小信号增益的放大及小信号增益对能量的提取有关, 故在进行小信号放大时, 种子功率应高于 0.3 W, 才能有效提取增益光纤中储存的能量, 得到有效放大; 当种子功率超过 0.3 W 时, 最高温度与抽运端熔接点的温差比例随种子功率的增加而下降; 当种子功率达到 8 W 后, 最高温度与抽运端熔接点的温差比例降为, 说明此时熔接点的温度最高.

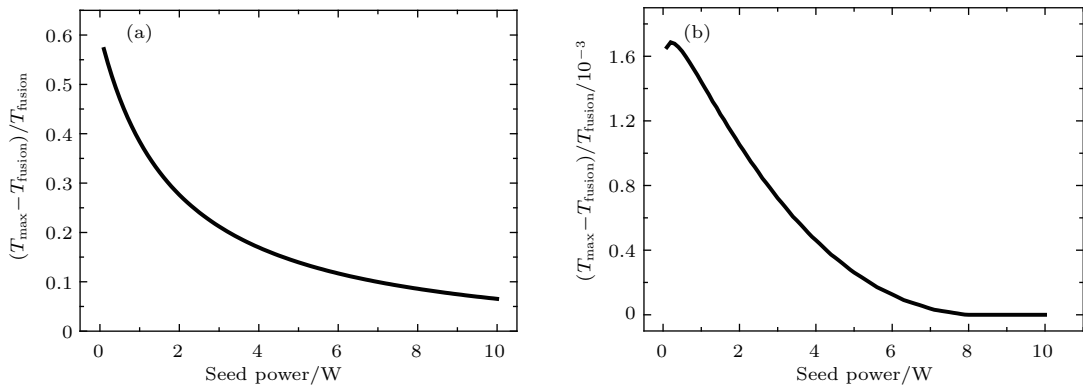


图 11 最高温度与熔接点的温差比例随种子功率的变化 (a) 915 nm 抽运; (b) 975 nm 抽运

Fig. 11. Temperature difference ratio between the maximum temperature and the fusion point with different seed power: (a) 915 nm pump; (b) 975 nm pump.

综上所述, 在相同的抽运功率下, 当种子功率较小时, 光纤放大器中的 ASE 较为严重, 系统放大倍率较高, 最高温度点与抽运注入熔接点有一定距离. 在实际实验中, 为了保证放大器稳定安全地运行, 应注意控制最高温度与抽运端熔接点的温差比例低于 10%, 同时 ASE 功率不宜太大. 因此, 915 nm 抽运时, 种子功率最好超过 7 W; 975 nm 抽运时, 种子功率最好不低于 8 W. 在相同条件下, 975 nm 抽运时, 光纤放大器的性能更佳.

3.2 抽运功率对 ASE 和温度特性的影响

抽运功率的大小会影响 ASE 功率和放大器的温度特性, 这是因为抽运过多会导致增益饱和, 多余的抽运光转化为 ASE, 导致 ASE 功率迅速增长, 同时增益光纤中的纤芯温度也会迅速升高. 在高功率光纤放大器中, 为了有效利用抽运功率得到高功率输出, 同时抑制 ASE 和控制增益光纤纤芯温度, 需要选择合适的抽运功率. 当抽运功率的范围为 500—5000 W、种子功率为 10 W 时, 分别对不同抽运波长下 ASE 在总功率中所占的比例、最高温度点在光纤中的位置、最高温度与抽运注入熔接点的温差比例进行了分析, 研究了抽运功率对 ASE 和温

度特性的影响.

ASE 在总功率中所占的比例如图 12 所示, 可以看出, ASE 在总输出功率中所占的比例都随抽运功率的增加逐渐减小, 两种抽运波长下 ASE 在总功率中所占的比例的变化曲线大致相同, 只是数值不同, 数值的差异是由于增益光纤对两种抽运光吸收的强弱和增益光纤长度不同造成的. 不同抽运功率下的 ASE 功率和输出功率如图 13 所示, 结合图 12 可以看出, 随着抽运功率的增加, ASE 功率和输出功率几乎都呈线性增长, 但 ASE 在总功率中所占的比例逐渐减小, 表明 ASE 功率的增长速率低于信号功率的增长速率; ASE 在总功率中所占的比例的下降趋势逐渐减缓, 表明 ASE 功率的增长速率逐渐升高. 这是由于光纤中的增益逐渐饱和, 导致增益光纤对抽运功率的吸收率降低, 过多的抽运功率使 ASE 功率迅速增长. 在抽运功率较大时, 系统放大倍率较高, ASE 较为严重; 在相同的抽运功率下, 975 nm 抽运时的输出功率更高, ASE 功率更小, 因此 975 nm 抽运时光纤放大器的性能更佳. 在实际实验中, 为了保护光纤放大器的前端器件, 应注意控制抽运功率, 避免 ASE 功率快速增长损坏前端器件.

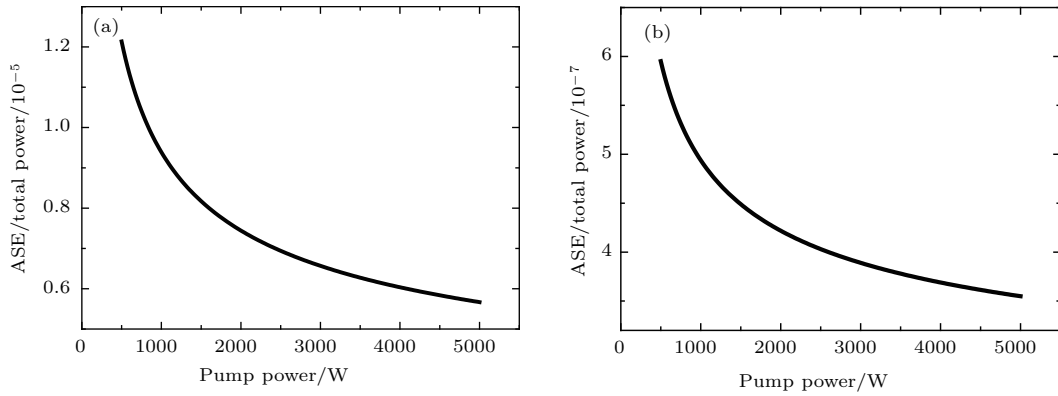


图 12 不同抽运功率下 ASE 在总功率中所占的比例 (a) 915 nm 抽运; (b) 975 nm 抽运

Fig. 12. Ratio of ASE to total power with different pump power: (a) 915 nm pump; (b) 975 nm pump.

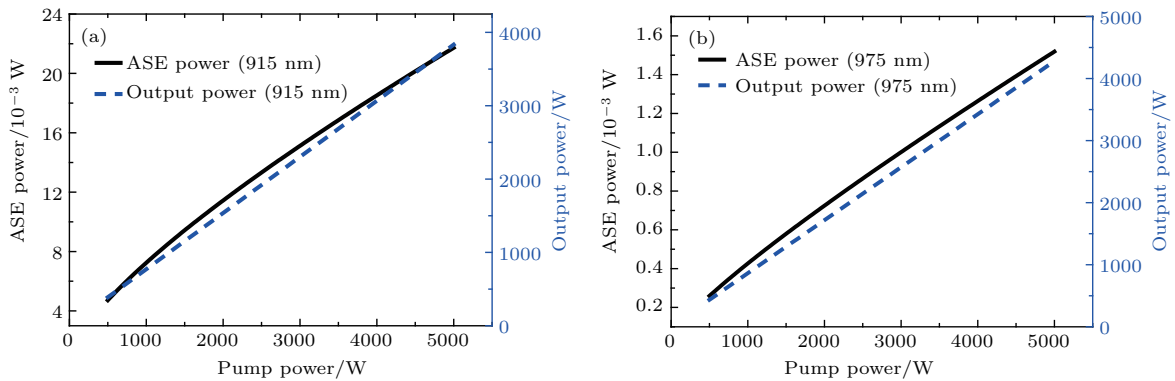


图 13 (网刊彩色) 不同抽运功率下的 ASE 功率和输出功率 (a) 915 nm 抽运; (b) 975 nm 抽运

Fig. 13. (color online) ASE power and output power with different pump power: (a) 915 nm pump; (b) 975 nm pump.

最高温度点在光纤中的位置如图 14 所示, 可以看出, 在两种抽运波长下, 随着抽运功率的增加, 最高温度点在光纤中的位置都呈阶梯状逐渐远离抽运端熔接点, 这是因为随着抽运功率的增加, 上能级粒子数随之增长, 相同上能级粒子数在增益光纤中对应的位置逐渐远离抽运端熔接点, 如图 15 所示 (由于上能级粒子数在靠近抽运端熔接点 2 m 内变化较大, 故只给出了上能级粒子数在增益光纤 2 m 内的变化趋势图), 因此种子功率沿增益光纤长度方向可以提取更多能量, 产生更多废热, 导致最高温度点远离抽运端熔接点. 915 nm 抽运时, 受限于上能级粒子数的饱和效应, 最高温度点远离抽运端熔接点的速率逐渐减缓. 975 nm 抽运时, 最高温度点远离抽运端熔接点的速率变化较小, 这是由于增益光纤对 975 nm 的抽运光吸收较强造成的.

最高温度与抽运端熔接点的温差比例如图 16 所示, 可以看出, 915 nm 抽运时, 随着抽运功率的增加, 最高温度与抽运端熔接点的温差比例几乎呈线性上升趋势, 这是因为随着抽运功率的增

加, 上能级粒子数越多, 种子功率能够提取更多能量, 产生更多废热, 导致最高温度与抽运端熔接点的温差比例越来越大. 975 nm 抽运时, 随着抽运功率的增加, 最高温度与抽运端熔接点的温差比例在抽运功率小于 1225 W 时为, 说明此时的熔接点即为温度最高点, 当抽运功率大于 1225 W 时, 最高温度与熔接点的温差比例几乎呈线性上升趋势, 这与图 14 (b) 的仿真结果一致.

综上所述, 在相同的种子功率下, 当抽运功率较大时, 光纤放大器中的 ASE 增长速率较快, 放大器中的 ASE 较为严重, 系统放大倍率较高, 最高温度点与抽运注入熔接点有一定距离. 在实际实验中, 为了保证放大器稳定安全地运行, 应注意控制最高温度与抽运端熔接点的温差比例低于 10%, 同时注意控制 ASE 的增长速率, 系统中的 ASE 功率不宜太大. 因此, 915 nm 抽运时, 抽运功率最好不要超过 1250 W; 975 nm 抽运时, 抽运功率不宜太大, 应注意控制 ASE 的增长速率, 使系统的 ASE 功率保持在器件的安全范围内. 在相同条件下, 975 nm 抽运时, 光纤放大器的性能更佳.

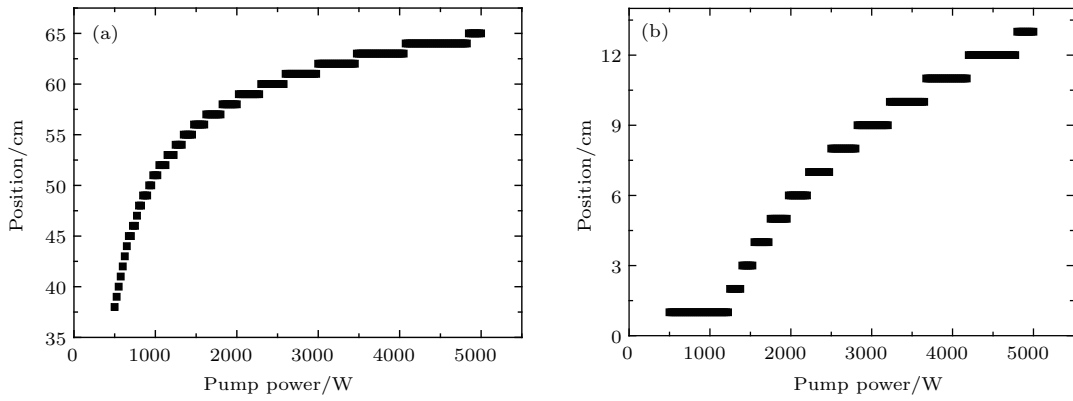


图 14 不同抽运功率下最高温度点在光纤中的位置 (a) 915 nm 抽运; (b) 975 nm 抽运

Fig. 14. Position of the maximum temperature point in the fiber with different pump power: (a) 915 nm pump; (b) 975 nm pump.

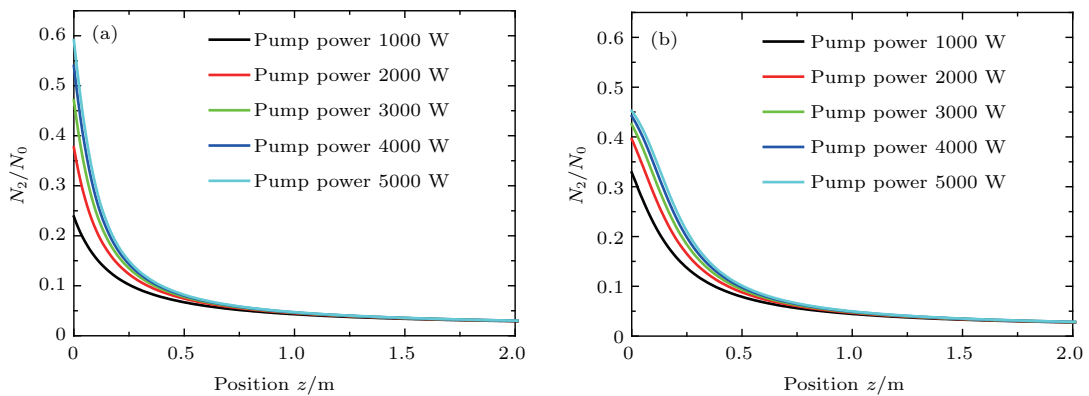


图 15 (网刊彩色) 不同抽运功率下上能级粒子数在增益光纤 (2 m 内) 中的分布 (a) 915 nm 抽运; (b) 975 nm 抽运

Fig. 15. (color online) The distribution of upper level population in gain fibers (within two meters) with different pump power: (a) 915 nm pump; (b) 975 nm pump.

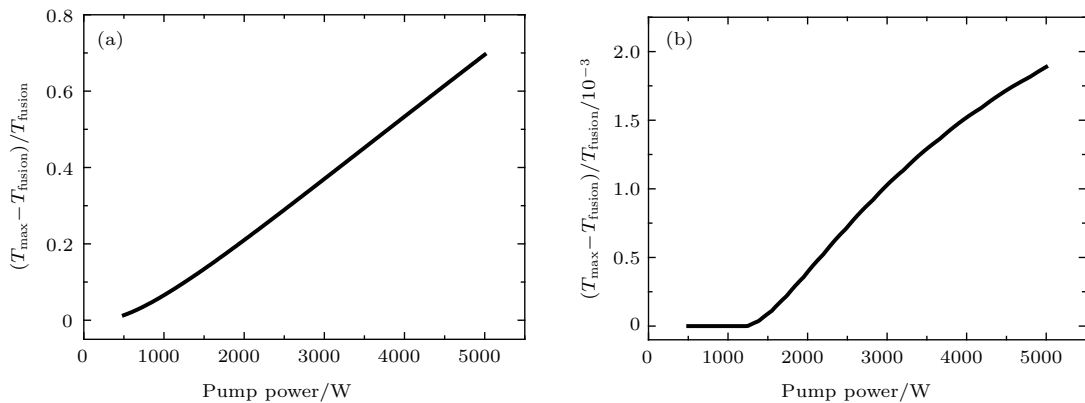


图 16 最高温度与熔接点的温差比例随抽运功率的变化 (a) 915 nm 抽运; (b) 975 nm 抽运

Fig. 16. Temperature difference ratio between the maximum temperature and the fusion point with different pump power: (a) 915 nm pump; (b) 975 nm pump.

3.3 抽运吸收对 ASE 和温度特性的影响

在光纤放大器中, 抽运吸收会影响 ASE 功率和放大器的输出特性. 合适的抽运吸收既能优化放大器的输出, 又能抑制 ASE. 当抽运功率

为 1000 W、种子功率为 10 W 时, 系统总吸收在 10—25 dB 的范围内变化, 对不同抽运波长下 ASE 在总功率中所占的比例、最高温度点在光纤中的位置、最高温度与抽运注入熔接点的温差比例进行了分析, 研究了抽运吸收对 ASE 和温度特性的影响.

ASE在总功率中所占的比例如图 17 所示, 结合图 18 可以看出, 915 nm 抽运时, ASE 在总功率中所占的比例和 ASE 功率都随抽运吸收的增加而增加, 当抽运吸收超过 20 dB 后, ASE 在总功率中所占的比例和 ASE 功率都迅速增长, 故在实际实验中应注意将一级放大的抽运总吸收控制在 20 dB 内; 975 nm 抽运时, 随着抽运吸收的增加, ASE 在总功率中所占的比例和 ASE 功率都逐渐增加, 增长速率变化不大, 这是由于增益光纤对 975 nm 的抽运光吸收较强造成的. 比较图 17 (a) 和图 17 (b), 975 nm 抽运时的 ASE 在总功率中所占的比例比 915 nm 抽运时低两个数量级, 这是因为 915 nm 抽

运时增益光纤对抽运光的吸收弱, 在相同的总吸收下, 增益光纤更长导致产生更多的 ASE. 不同抽运吸收下 ASE 功率和输出功率如图 18 所示, 随着抽运吸收的增加, ASE 功率和输出功率都逐渐增长, 但输出功率的增长速率逐渐减小, ASE 功率的增长速率逐渐增大, 这是由于种子功率对光纤中储存能量的提取能力有限, 过多的抽运吸收导致能量向 ASE 转移. 在抽运吸收较大时, 系统放大倍率较高, ASE 较为严重; 在相同的抽运吸收下, 975 nm 抽运时的输出功率更高, ASE 功率更小, 因此 975 nm 抽运时光纤放大器的性能更佳.

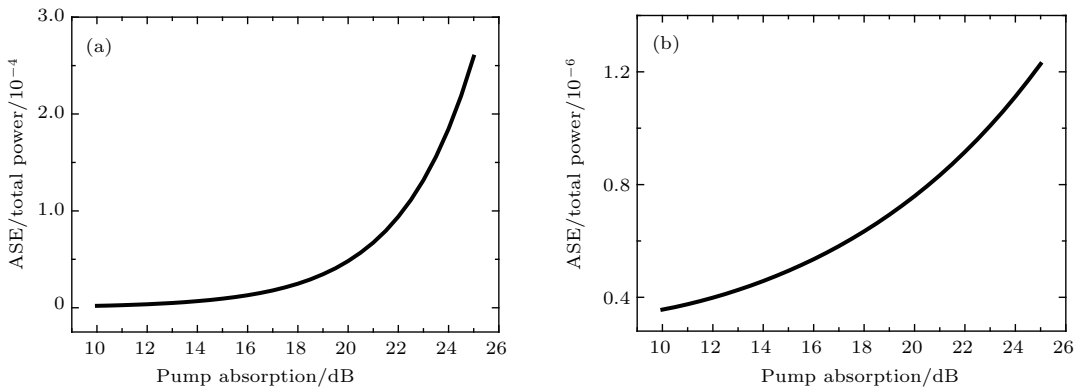


图 17 不同抽运吸收下 ASE 在总功率中所占的比例 (a) 915 nm 抽运; (b) 975 nm 抽运

Fig. 17. Ratio of ASE to total power with different pump absorption: (a) 915 nm pump; (b) 975 nm pump.

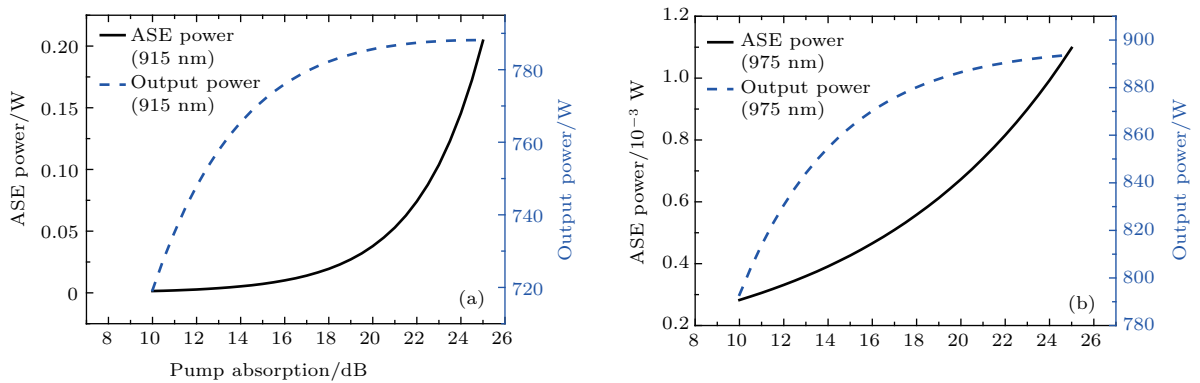


图 18 (网刊彩色) 不同抽运吸收下的 ASE 功率和输出功率 (a) 915 nm 抽运; (b) 975 nm 抽运

Fig. 18. (color online) ASE power and output power with different pump absorption: (a) 915 nm pump; (b) 975 nm pump.

最高温度点在光纤中的位置如图 19 所示, 可以看出, 915 nm 抽运时, 随着抽运吸收的增加, 最高温度点在光纤上的位置逐渐接近于抽运端熔接点, 这是因为随着抽运吸收的增加, 相同上能级粒子数在增益光纤中对应的位置逐渐接近于抽运端熔接点, 如图 20 (a) 所示 (由于上能级粒子数在靠近抽运端熔接点 2 m 内变化较大, 故只给出了上能

级粒子数在增益光纤 2 m 内的变化趋势图), 因此种子功率在靠近抽运端熔接点可以提取更多能量, 产生更多废热, 导致最高温度点逐渐接近抽运端熔接点; 975 nm 抽运时, 最高温度点在光纤上的位置保持不变, 固定在抽运端熔接点处, 这是由于增益光纤对 975 nm 的抽运光吸收较强从而能够提供足够上能级粒子数造成的. 结合图 17 (b) 可知, 在实

实际实验中, 由于增益光纤对 975 nm 的抽运光吸收较强, 故为了抑制 ASE 应选择吸收系数较小的增益光纤.

最高温度与抽运端熔接点的温差比例如图 21 所示, 可以看出, 915 nm 抽运时, 随着抽运吸收的增加, 最高温度与抽运端熔接点的温差比例几乎呈线性上升趋势, 这是因为上能级粒子数的

浓度梯度随抽运吸收的增加而增加(如图 20 (a) 所示), 导致种子功率对增益光纤中储存的能量提取得更多, 从而产生更多废热, 使光纤温度升得更高; 975 nm 抽运时, 随着抽运吸收的增加, 最高温度与抽运端熔接点的温差比例均为 0, 表明抽运端熔接点即为温度最高点, 这与增益光纤对 975 nm 的抽运光吸收较强有关.

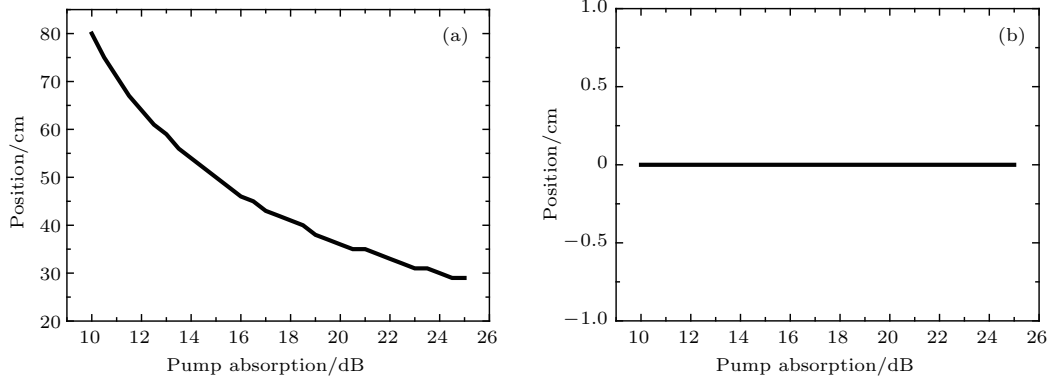


图 19 不同抽运吸收下最高温度点在光纤中的位置比例 (a) 915 nm 抽运; (b) 975 nm 抽运

Fig. 19. Position ratio of the maximum temperature point in the fiber with different pump absorption: (a) 915 nm pump; (b) 975 nm pump.

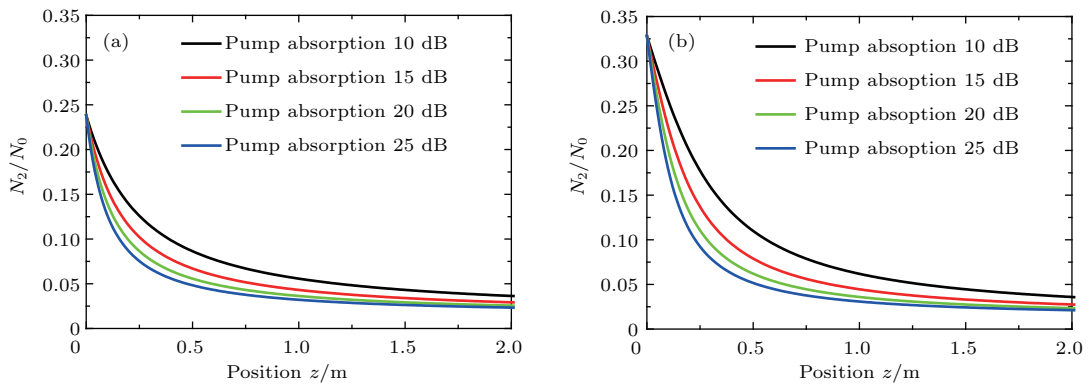


图 20 (网刊彩色) 不同抽运吸收下上能级粒子数在增益光纤 (2 m 内) 中的分布 (a) 915 nm 抽运; (b) 975 nm 抽运

Fig. 20. (color online) The distribution of upper level population in gain fibers (within two meters) with different pump absorption: (a) 915 nm pump; (b) 975 nm pump.

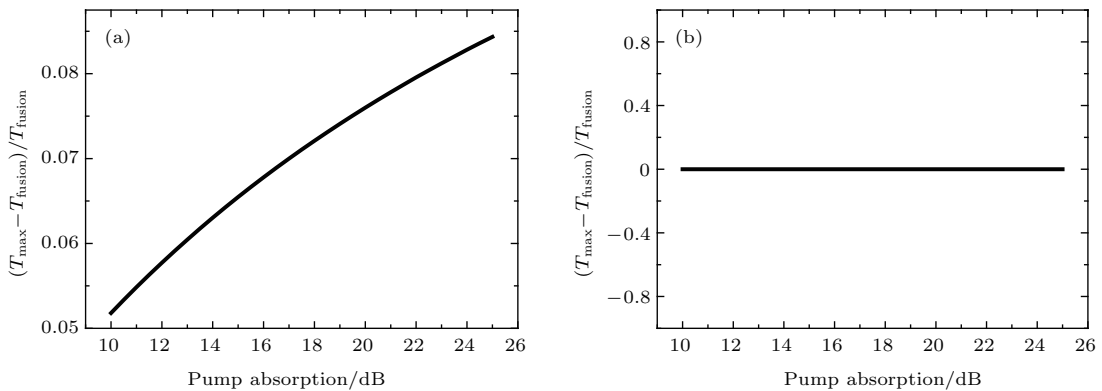


图 21 最高温度与熔接点的温差比例随抽运吸收的变化 (a) 915 nm 抽运; (b) 975 nm 抽运

Fig. 21. The temperature difference ratio between the maximum temperature and the fusion point with different pump absorption: (a) 915 nm pump; (b) 975 nm pump.

综上所述,在相同的种子功率和抽运功率下,当抽运吸收较大时,光纤放大器中的ASE增长速率较快,放大器中的ASE较为严重,系统放大倍率较高,915 nm抽运时,最高温度点与抽运注入熔接点有一定距离,975 nm抽运时,最高温度点在抽运注入熔接点处.在实际实验中,为了保证放大器稳定安全地运行,应注意控制ASE的增长速率,系统中的ASE功率不宜太大.因此,915 nm抽运时,抽运吸收最好不要超过20 dB;975 nm抽运时,由于增益光纤对975 nm的抽运光的吸收较强,抽运吸收不宜太大.在相同条件下,975 nm抽运时,光纤放大器的性能更佳.

4 结 论

本文针对实际放大器中光纤容易烧毁,且烧毁点的位置距离抽运端熔接点10—50 cm的实际情况,建立了基于速率方程和热传导方程的理论模型,理论仿真了光纤放大器中的ASE特性与最高温度点的位置.结果表明,理论上最高温度点的位置与实验中实际损伤点的位置符合较好.进一步的详细研究表明:在不同抽运波长下,当抽运功率一定时,种子功率越小,ASE功率越大,ASE在总功率中所占的比例越高,最高温度点的位置距离抽运端熔接点越远,最高温度与熔接点的温差比例越大;当种子功率一定时,抽运功率越高,ASE功率越大,ASE在总功率中所占的比例越低,最高温度点的位置距离抽运端熔接点越远,最高温度与熔接点的温差比例越大;915 nm抽运时,总的抽运吸收越强,ASE功率越大,ASE在总功率中所占的比例越高,最高温度点的位置距离熔接点越近,最高温度与熔接点的温差比例越大;975 nm抽运时,总的抽运吸收越强,ASE功率越大,ASE在总功率中所占的比例越高,最高温度点的位置固定在抽运端熔接点处.理论研究表明,915 nm抽运时,种子功率最好超过7 W,抽运功率最好不超过1250 W,抽运吸收最好低于20 dB;975 nm抽运时,种子功率最好不低于8 W,由于ASE功率随抽运功率的增加

而增长,所以抽运功率的选择最好在器件安全范围内,由于增益光纤对975 nm的抽运光的吸收较强,所以抽运吸收不宜太大;在相同的条件下,975 nm抽运时,光纤放大器的性能更佳.在光纤放大器的设计中,为了保证放大器的安全,放大器的放大倍率不宜过高,以小于50倍为宜,否则会导致放大器内部局部高温,使得放大器存在烧毁的风险.

参考文献

- [1] Liem A, Limpert J, Zellmer H 2003 *Opt Lett.* **28** 1537
- [2] Jeong Y, Nilsson J, Sahu J K 2005 *Opt. Lett.* **30** 459
- [3] Sintov Y, Y G, Koplowitch T, Wang B 2008 *Opt. Commun.* **281** 1162
- [4] Han Q, Ning J P, Zhou L, Zhang W Y, Chen Z 2009 *Laser Technol.* **33** 541 (in Chinese) [韩群, 宁继平, 周雷, 张伟毅, 陈铮 2009 激光技术 **33** 541]
- [5] Fan Y Y, He B, Zhou J, Zheng J T, Liu H K, Wei Y R, Dong J X, Lou Q H 2011 *Opt. Express* **19** 15162
- [6] Zhang S, Wang X 2013 *Opt. Commun.* **295** 155
- [7] Lapointe M A, Chatigny S, Piché M, Cain-Skaff M, Maran J N 2009 *Proc. SPIE* **7195** 719511
- [8] Chen Z L, Hou J, Jiang Z F 2007 *Laser Technol.* **5** 544 (in Chinese) [陈子伦, 侯静, 姜宗福 2007 激光技术 **5** 544]
- [9] Kelson I, Hardy A 1998 *IEEE J. Quantum Elect.* **34** 1570
- [10] Kelson I, Hardy A 1999 *J. Lightwave Technol.* **17** 891
- [11] Wang X L, Tao R M, Zhang H W, Zhou P, Xu X J 2014 *Chin. J. Lasers* **11** 119 (in Chinese) [王小林, 陶汝茂, 张汉伟, 周朴, 许晓军 2014 中国激光 **11** 119]
- [12] Xiong Y 2006 *M. S. Dissertation* (Chengdu: Southwest Jiaotong University) (in Chinese) [熊悦 2006 硕士学位论文 (成都: 西南交通大学)]
- [13] Brown D C, Hoffman H J 2001 *IEEE J. Quantum Elect.* **37** 207
- [14] Smith A V, Smith J J 2013 *Opt. Express* **21** 2606
- [15] Maxim B, Paul W, Nicholas C 2000 *J. Lightwave Technol.* **18** 1533
- [16] Yoshito S, Shuichi Y, Shuichiro A, Masaru K, Ryo N 2003 *J. Lightwave Technol.* **21** 2511
- [17] Xiao H 2012 *Ph. D. Dissertation* (Changsha: National University of Defense Technology) (in Chinese) [肖虎 2012 博士学位论文 (长沙: 国防科学技术大学)]
- [18] Zhao Z Y, Duan K Q, Wang J M, Zhao W, Wang Q S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6335 (in Chinese) [赵振宇, 段开棕, 王建明, 赵卫, 王屹山 2008 物理学报 **57** 6335]

Amplified spontaneous emission characteristics and locations of high temperature vulnerable point in fiber amplifiers*

Luo Yi Wang Xiao-Lin[†] Zhang Han-Wei Su Rong-Tao Ma Peng-Fei Zhou Pu
Jiang Zong-Fu[‡]

(Hunan Provincial Collaborative Innovation Center of High Power Fiber Laser, Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(Received 27 December 2016; revised manuscript received 18 July 2017)

Abstract

Master oscillator power amplifier (MOPA) is a common configuration in fiber lasers to obtain high power output. Amplified spontaneous emission (ASE) is amplified stage by stage by MOPA, which may result in damage to the fiber amplifier. In the experiment of high-power fiber amplifier, thermal effect is one of the most critical issues. High temperature from significant thermal effect would restrict the further improvement of laser power and cause the fiber to damage. In most of the experiments, the gain fibers are broken usually at the place 10–50 cm away from the fused point of the pump injection end. To better understand in physics the highest temperature and the position of the burning point, we study the ASE and temperature characteristics by using the rate equation model of fiber laser and the thermal conduction model of gain fiber. We analyze the influences of seed power, pump power and pump absorption on Yb-doped double-cladding fiber amplifier. The results show that when magnification is relatively high and ASE is serious, the highest temperature point of the fiber amplifier is not at the fused point of the pump injection end but at the place 10–50 cm away from the fused point, which consists well with the experimental result. For studying the ASE suppression and the temperature control of the hottest point, we compare the three parameters in the 915 nm pumped case with those in the 975 nm pumped case, these being power ratio of ASE to the output laser, hottest location along the fiber, and the ratio of the temperature difference between the highest temperature and fusion point temperature to the latter one. It is concluded that the optimal parameters for the 915 nm pumped case are seed power larger than 7 W, pump power less than 1250 W, and pump absorption less than 20 dB. As to the 975 nm pumped case, it is suggested that the seed power should be not less than 8 W with an appropriate pump power. The research also implies that a better performance of fiber amplifier is pumped by 975 nm under the same condition. To prevent the local internal hot point from forming and the potential burnout risk from happening, the magnification of fiber amplifier needs to be set below 50-fold. In conclusion, this work presents a suggestion for optimizing the fiber amplifier design through using appropriate seed power, pump power, pump absorption, magnification and pump wavelength.

Keywords: fiber amplifier, amplified spontaneous emission, temperature characteristics

PACS: 42.60.Da, 42.55.Wd, 42.55.Xi

DOI: 10.7498/aps.66.234206

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61505260, 61735007).

[†] Corresponding author. E-mail: chinawxllin@163.com

[‡] Corresponding author. E-mail: jiangzongfu7@163.com