

γ 射线作用下光纤激光器的功率特性及热效应分析

湛鸿伟*, 陶蒙蒙, 赵海川, 赵柳, 栾昆鹏, 沈炎龙, 黄珂, 冯国斌

西北核技术研究院激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024

摘要 在辐射环境中工作的光纤激光器受到的辐射损伤会导致激光器功率退化, 进而引起辐射致产热, 从而影响到激光器的正常应用和系统安全。基于此, 建立一种辐射环境表征参量与光纤激光器增益光纤内功率、热效应和温度分布的关系模型, 开展稳态 γ 射线作用下掺镱双包层光纤激光器的功率特性及热效应的数值模拟仿真。研究了辐致损耗、辐射剂量、光纤长度以及泵浦方式对输出功率的影响, 并对不同泵浦方式下增益光纤内的热效应进行了分析。相关结果能够为光纤激光器的辐射效应研究工作及在辐射环境下的工程应用设计提供参考。

关键词 激光器; 光纤激光器; 辐射效应; 辐致损耗; 功率退化; 热效应

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0401004

Power Characteristics and Thermal Effects of the Gamma-Ray Radiated Fiber Lasers

Chen Hongwei*, Tao Mengmeng, Zhao Haichuan, Zhao Liu, Luan Kunpeng, Shen Yanlong, Huang Ke, Feng Guobin

State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China

Abstract The fiber lasers operating in a radiation environment will suffer from radiation damage, which will reduce the output power and generate radiation-induced heat. This will affect the normal application of the lasers and the safety of the system. In this study, we intend to establish the relation between the radiation environment characterization parameters and the power, thermal effect, and temperature distribution with respect to the gain fiber of the fiber lasers. Subsequently, we conduct a numerical simulation with respect to the power characteristics and thermal effects of the γ -ray radiated double-clad fiber lasers. Additionally, we study the effects of the radiation-induced loss, radiation dose, fiber length, and pumping style on the output power of the lasers. Furthermore, we analyze the thermal effects of the fiber lasers under different pumping styles. The results of this study could provide a reference to study the radiation effects of the fiber lasers.

Key words lasers; fiber lasers; radiation effect; radiation-induced loss; degradation of output power; thermal effect

OCIS codes 140.3460; 140.3510; 140.3580; 140.5560; 140.5680

1 引 言

光纤激光器具有结构简单、转换效率高、热管理方便、光束质量好等优点^[1-5], 目前已经在通信传感、生物医学、工业加工等许多领域得到了广泛的应用, 并且其应用领域及场景还在不断丰富中。但是, 在辐射环境中, 由于辐射效应会使光纤激光器受到辐射损伤, 系统性能退化^[6-7], 因此有必要对光纤激光

器的辐射效应及其影响开展相关研究。

近年来, 相关研究单位开展了双包层光纤激光器的 γ 射线辐照实验, 观察到在 γ 射线作用下光纤激光器的输出功率发生了明显的退化^[8-11]。在本课题组前期的辐照实验研究中, 也同样观察到光纤激光器的输出功率随辐射剂量的增加而急剧下降的现象^[12]。以文献[8]为例, 研究人员对双包层掺镱光纤进行了辐射剂量为 745 Gy 的 γ 射线辐照, 光纤激

收稿日期: 2019-10-24; 修回日期: 2019-11-20; 录用日期: 2019-12-12

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室基金(SKLLIM1801Z)

* E-mail: chenhongwei@nint.ac.cn

光器的光-光转换效率从 70.8%退化至 15.68%。从能量转换的角度来看, γ 射线辐射作用光纤激光器后, 有 55.12% 的泵浦光能量没能参与到有效的激光产生过程, 而是沉积到了光纤激光器中(主要是在增益光纤内), 沉积的泵浦光能量经过一系列复杂的转移过程, 最终通过无辐射跃迁过程转变成热能^[3], 称这个过程为光纤激光器的辐射致产热过程。辐射致产热成为在辐射环境中工作的光纤激光器的新热量来源, 并且随着辐射剂量的累积, 越来越多的泵浦能量会通过光纤激光器的辐射致产热过程转换成热能, 甚至会远远超过量子亏损产生的热能(掺镱光纤激光器的泵浦光波长通常为 976 nm, 激光工作波长在 1070 nm 附近, 量子亏损大约为 10%), 从而导致严重的热效应。增益光纤中过高的温度会引起激光器光束质量退化及模式不稳定现象, 这会影响光纤激光器的实际使用^[13-14]。并且, 因增益光纤涂覆层的安全许可温度为 80 °C, 光纤激光器增益光纤内部温度过高会损坏光纤, 甚至会烧毁光纤激光器, 引发系统性的危害^[15]。

目前, 光纤激光器辐射效应相关研究工作主要是对辐射作用导致的光纤激光器功率退化进行了实

验现象介绍和初步的定性解释, 关于辐射作用导致光纤激光器功率退化规律的研究报道并不多。并且, 目前辐照实验的研究对象主要是中低功率水平的光纤激光器, 光纤激光器的辐射致产热问题尚未引起研究人员足够的重视。掺稀土离子光纤是光纤激光器的增益介质, 是光纤激光器的核心器件, 同时也是对辐射作用最为敏感的器件。相关研究表明, 辐射致增益光纤性能的变化对光纤激光器系统性能, 特别是对输出功率的影响是十分明显的。作为初步研究, 本文主要集中于分析和探讨 γ 射线作用增益光纤对激光器的功率特性及热效应的影响。通过建立辐射环境表征参量与光纤激光器增益光纤内功率、热效应和温度分布的关系模型, 开展稳态 γ 射线作用下掺镱双包层光纤激光器功率特性及热效应的数值仿真研究, 对不同因素的影响进行分析和讨论。

2 理论模型

一般, 不含非线性效应和放大自发辐射(ASE)的线型腔连续波掺镱光纤激光器的稳态速率方程组可简化为^[16]

$$N_2(z) = N \frac{\frac{\Gamma_p \sigma_{ap} P_p^+(z) \lambda_p}{hcA_{eff}} + \frac{\Gamma_s \sigma_{as} P_s^+(z) \lambda_s}{hcA_{eff}}}{\frac{\Gamma_p (\sigma_{ap} + \sigma_{ep}) P_p^+(z) \lambda_p}{hcA_{eff}} + \frac{\Gamma_s (\sigma_{as} + \sigma_{es}) P_s^+(z) \lambda_s}{hcA_{eff}} + \frac{1}{\tau}}, \quad (1)$$

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

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

式中: z 为增益光纤内轴向某点的坐标; N 和 N_2 分别为总的掺杂粒子数密度和激发态粒子数密度; λ_p 与 λ_s 分别为泵浦光和信号光的波长; $P_p^\pm(z)$ 、 $P_s^\pm(z)$ 分别为 z 处前向、后向传输的泵浦光与信号光的功率; σ_{ep} 和 σ_{ap} 分别为泵浦光波长处的发射截面和吸收截面; σ_{es} 和 σ_{as} 分别表示信号光波长处的发射截面和吸收截面; Γ_p 和 Γ_s 分别为泵浦光和信号光波长处的填充因子; A_{eff} 为纤芯有效模场面积; h 为普朗克常数; c 为光速; τ 为激发态粒子寿命; α_p 、 α_s 分别为光纤中泵浦光、信号光波长处的本征吸收损耗系数; L 为增益光纤长度。该方程组满足的边界条件如下: $P_s^+(0) = R_1 P_s^-(0)$, $P_s^+(L) = R_2 P_s^-(L)$, 其中 R_1 、 R_2 分别为信号光在激光腔两

端的反射率。

在辐射环境中使用光纤激光器时, 辐致损耗被认为是 γ 射线作用增益光纤引起的最为明显的宏观性能变化。但是, 相关研究显示增益光纤辐致损耗的产生与为改善光纤性能而加入的磷(P)或铝(Al)等共掺剂密切相关, 与稀土离子本身关系并不大, γ 射线作用并没有破坏掺稀土离子光纤的发光和光放大机制^[2-3]。目前, 增益光纤辐致损耗的机制尚不完全清楚, 研究人员提出用 Power-Law 定理来预测光纤辐致损耗与辐射剂量等辐射环境表征参数的关系, 其具体表达式^[17]为 $\alpha(D) = a \cdot D^b$, 其中 $\alpha(D)$ 为光纤辐致损耗(单位 $\text{dB} \cdot \text{m}^{-1}$), D 为辐射剂量(单位 Gy), a 和 b 为拟合常数。在对 γ 射线作用下的

光纤激光器进行分析时,可将增益光纤的辐致损耗作为新引入的背景损耗项考虑,也即(2)式和(3)式中的损耗系数应修正为 $\alpha'_p[\alpha'_p = \alpha_p(D) + \alpha_p]$ 和 $\alpha'_s[\alpha'_s = \alpha_s(D) + \alpha_s]$,联立(1)~(3)式进行求解,可以得到 $P_s^\pm(z)$ 和 $P_p^\pm(z)$,也即获得光纤激光器在受到 γ 射线作用后增益光纤内的功率分布特性。

接下来分析光纤激光器的热效应, γ 射线作用下增益光纤内的热量来源除了泵浦光向信号光转换过程中的量子亏损 Q_1 ,以及增益光纤对泵浦光和信号光的背景吸收产热 Q_2 之外,还有辐射致产热 Q_3 。 Q_3 的产生主要是因为 γ 射线作用导致增益光纤对泵浦光和信号光有辐射致吸收。在分析 γ 射线作用下光纤激光器的热效应时, Q_1 和 Q_2 被认为是背景项, Q_3 与辐射导致的增益光纤的性能变化有关,被认为是与辐射环境表征参数有关的变量。类比光纤背景损耗产热过程^[18],对 Q_3 进行计算,综合 Q_1 、 Q_2 和 Q_3 可获得增益光纤内总的热能分布,各部分的具体表达式为

$$Q_1(z) = \left(\frac{\lambda_s - \lambda_p}{\lambda_p} \right) \frac{P_p^\pm(z) [\sigma_{ap} N - (\sigma_{ap} + \sigma_{ep}) N_2(z)]}{A_{in}}, \quad (4)$$

$$Q_2(z) = \frac{\alpha_p P_p^\pm(z)}{A_{in}} + \frac{\alpha_s P_s^\pm(z)}{A_{eff}}, \quad (5)$$

$$Q_3(z) = \frac{\alpha_p(D) P_p^\pm(z)}{A_{in}} + \frac{\alpha_s(D) P_s^\pm(z)}{A_{eff}}, \quad (6)$$

式中: A_{in} 为光纤内包层截面积。则增益光纤总的热负载为

$$Q(z) = Q_1(z) + Q_2(z) + Q_3(z). \quad (7)$$

根据光纤的热传导理论,双包层增益光纤纤芯温升 $\Delta T(0, z)$ 表达式为^[18]

$$\Delta T(0, z) = r_1^2 Q(z) \left[\frac{1}{2Hr_3} + \frac{1}{4k_1} + \frac{1}{2k_2} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{2k_3} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) \right], \quad (8)$$

式中: H 为涂覆层材料的热传递系数; r_1 为纤芯半径; r_2 为内包层半径; r_3 为外包层半径; k_1 为纤芯导热系数; k_2 为内包层导热系数; k_3 为外包层导热系数。

综上,可将辐射对光纤激光器的影响融合进现有的激光器分析模型,从而建立起辐射环境表征参数与激光器增益光纤内功率、热效应以及温度分布的关系模型。

3 数值仿真结果与讨论

根据第2节中的数学模型,对 γ 射线作用下20/400双包层掺镱光纤激光器的功率特性及热效应进行数值仿真分析,仿真中用到的主要参数如表1所示。需要指出的是,光纤的辐致损耗具有波长差异性和温度漂白效应。相关研究表明:光纤辐致损耗主要集中在可见光波段附近,900 nm以上红外波段的光纤辐致损耗相比可见光波段附近要小很多,波长差异性也不显著^[8,19]。同时,Girard等^[19]通过实验证明了900 nm以上红外波段的光纤辐致损耗受到的辐射剂量和温度的影响也比可见光波段附近小很多。为了简化模型,数值仿真中忽略了温度引起的镱离子吸收和发射截面的变化,以及光纤辐致损耗的温度及波长依赖性。

表1 仿真参数

Table 1 Parameters of simulation

Parameter	Value	Parameter	Value
λ_p	976 nm	σ_{ap}	$2.47 \times 10^{-24} \text{ m}^2$
λ_s	1 070 nm	σ_{ep}	$2.44 \times 10^{-24} \text{ m}^2$
Γ_p	0.0025	σ_{es}	$3.93 \times 10^{-27} \text{ m}^2$
Γ_s	0.9586	σ_{as}	$3.31 \times 10^{-25} \text{ m}^2$
α_p	0.003 m^{-1}	τ	$0.9 \times 10^{-3} \text{ s}$
α_s	0.005 m^{-1}	N	$5 \times 10^{25} \text{ cm}^{-3}$
R_1	0.99	R_2	0.04
r_1	$10 \times 10^{-6} \text{ m}$	k_1	$1.38 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
r_2	$200 \times 10^{-6} \text{ m}$	k_2	$1.38 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
r_3	$275 \times 10^{-6} \text{ m}$	k_3	$0.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

3.1 辐致损耗对输出功率的影响

文献[17]中列出了几种掺镱光纤的Power-Law定理实验拟合常数,其中 a 的取值通常在1~10 $\text{dB} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{Gy}^{-1}$ 量级, b 的取值在0.7至1.0之间,具体的取值与光纤的结构、尺寸、掺杂以及拉制工艺等因素有关。在辐射剂量为0~1000 Gy的 γ 射线作用下, a 和 b 取不同值时,增益光纤的辐致损耗曲线如图1所示。对不同辐致损耗条件下光纤激光器的输出功率进行了数值计算,相关结果如图2所示。数值模拟中,激光器采用前向泵浦方式,泵浦功率为1000 W,增益光纤长度取最优值13.6 m。由图1和图2可以看出:在固定的辐射剂量下, a 和 b 值增加,增益光纤的辐致损耗随之增大,激光器的输出功率随之减小;当增益光纤的辐致损耗过大时,譬如 $a = 12 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{Gy}^{-1}$ 和 $b = 0.8$ 情形中,在辐射剂量达到400 Gy以上时,光纤激光器几乎没有功率输出;当 a 和 b 取值固定时,随着辐射剂量的增

加,增益光纤的辐致损耗也增加,但激光器的输出功率呈指数型减小趋势,这与文献[10-12]报道的通过辐照实验获得的射线作用下光纤激光器的输出功率

退化规律是一致的。综上,增益光纤的辐致损耗对光纤激光器的功率特性有着较大的影响,是导致辐照作用后光纤激光器功率退化的主要因素。

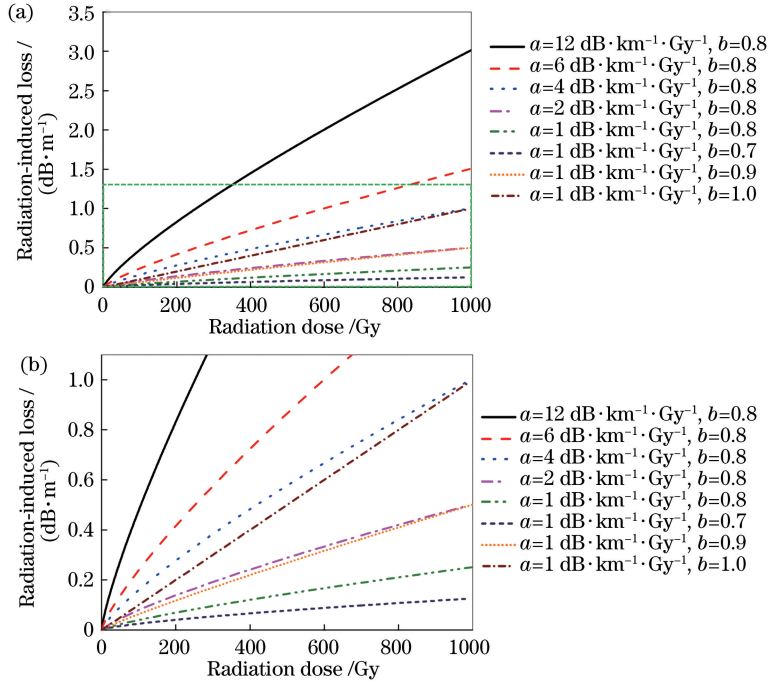


图 1 当 a 和 b 取不同值时,增益光纤的辐致损耗。(a)辐致损耗曲线;(b)图 1(a)虚线框部分的细节图
Fig. 1 Radiation-induced loss of gain fiber with different a and b . (a) Radiation-induced loss curves; (b) detailed view of dotted frame in Fig. 1(a)

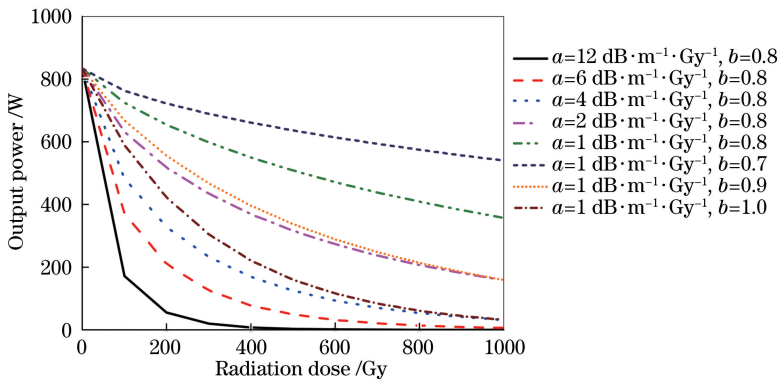


图 2 当 a 和 b 取不同值时,光纤激光器的输出功率
Fig. 2 Output power of fiber laser with different a and b

3.2 光纤长度对输出功率的影响

固定 Power-Law 定理拟合常数 $a = 2 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{Gy}^{-1}$ 和 $b=0.8$ (下同),其他条件不变,计算采用不同长度增益光纤时,光纤激光器受到不同剂量辐射作用后的输出功率,结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,在未受到辐射作用时,随着增益光纤长度的增加,输出功率逐渐提升,在最优长度(13.6 m)时达到了最大,然后随着增益光纤长度的增加,输出功率出现了轻微的退化。

同时,随着辐射剂量的增加,采用不同长度增益光纤的激光器的输出功率均出现了明显的下降。并且,在受不同剂量的辐射作用时,增益光纤的最优长度也不同。在无辐射作用时,光纤激光器增益光纤的最优长度为 13.6 m;但是,在受到 100 Gy 的 γ 射线作用后,采用 13.6 m 长的增益光纤的激光器输出功率比采用 8.8 m 增益光纤的激光器低了近 30 W。相关结果表明,增益光纤的长度对辐射作用下光纤激光器的输出功率也有着显著的影响。这主要是因为光纤越长,光纤总的辐致损耗也越大,而激光器的输出功率是增益与损耗等各个因素综合平衡的结

果。这也启发人们,在对辐射环境中使用的光纤激光器进行工程设计时,应该结合整个任务周期的辐射剂量来对增益光纤长度进行综合考虑,无辐射环境中的最优长度并不是好的选择,选择稍短一些的增益光纤可以在工作一定时间后获得相对较高的功率输出。

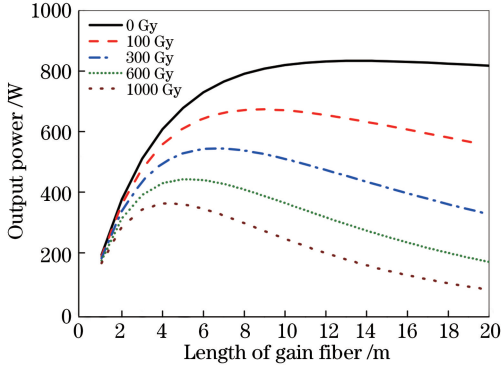


图3 采用不同长度增益光纤时,激光器的输出功率
Fig. 3 Output power of fiber laser with different gain fiber lengths

3.3 泵浦方式对输出功率的影响

固定增益光纤为 13.6 m,其他条件不变,计算了不同泵浦方式下光纤激光器受到不同剂量辐射作用后的输出功率,结果如图 4 所示。在不同的辐射剂量的 γ 射线作用下,后向泵浦激光器总能够获得最高的输出功率,双端泵浦(前、后向泵浦功率均为 500 W)的次之,前向泵浦的最低。进一步分析,在未受辐射作用时三种泵浦方式下光纤激光器的输

输出功率差异并不大,但受到辐射作用后,采用不同泵浦方式的激光器的输出功率出现了较大的差异。以辐射剂量为 0 Gy 和 1000 Gy 两种情形为例,不同泵浦方式下光纤激光器的输出功率和光-光转换效率如表 2 所示。在受到 1000 Gy 的 γ 射线作用后,前向泵浦激光器的输出功率比后向泵浦的低了近 180 W,然而双端泵浦激光器的输出功率只比后向泵浦的低 50 W。相关结果表明,泵浦方式对辐射作用下光纤激光器的输出功率也有重要的影响。并且,即便是采用能够实现较高功率输出的后向泵浦方式,1000 Gy 的 γ 射线作用也导致了近 50% 的泵浦光能量没能有效地参与激光产生过程,从而加剧了光纤激光器的热效应。

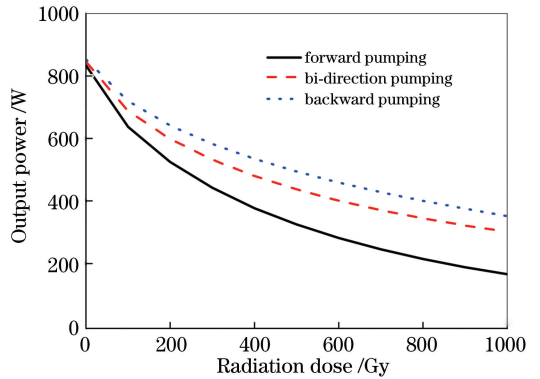


图4 采用不同泵浦方式时,激光器的输出功率
Fig. 4 Output power of fiber laser with different pumping configurations

表2 激光器的输出功率及光-光转换效率

Table 2 Output power and optical-to-optical conversion efficiency of fiber lasers

Radiation dose /Gy	Forward pumping		Bi-direction pumping		Backward pumping	
	Output power /W	Efficiency /%	Output power /W	Efficiency /%	Output power /W	Efficiency /%
0	833.78	83.38	845.67	84.57	853.49	85.35
1000	165.96	16.60	301.47	30.15	351.77	35.18

3.4 光纤激光器热效应分析

接下来对采用不同泵浦方式的光纤激光器受到辐射作用后的热效应进行数值仿真分析。激光器的仿真参数与 3.3 节保持一致,涂覆层材料的热传递系数 H 取值 $1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。第 2 节中 (4)~(6) 式表明,增益光纤内的热分布与泵浦光和信号光的功率分布有着密切联系。故计算了不同辐射剂量 γ 射线作用下增益光纤内泵浦光和信号光的功率,以及纤芯温升随增益光纤位置的分布情况,具体结果如图 5~7 所示。

图 5 所示为前向泵浦光纤激光器的特性曲线。从图 5(a)可以看出,由于是前向泵浦方式,泵浦功

率沿增益光纤轴向逐渐减小。辐射作用后增益光纤内泵浦光功率随着辐射剂量的增加而整体变弱,随增益光纤位置的分布规律并没有太大的变化。然而,增益光纤内信号光的功率分布情况随着辐射剂量的增加发生了明显的改变。随着辐射剂量的增加,信号光功率整体下降。未受辐射作用时,信号光功率沿增益光纤轴向逐渐增加;随着辐射剂量的增加,信号光功率沿增益光纤轴向先逐渐增加,在 4~8 m 位置处到达了一个信号光功率高点,然后逐渐减小。如图 5(b)所示,增益光纤内纤芯温升随增益光纤位置的分布情况也发生了明显的改变。未受辐射作用时,增益光纤内纤芯温升沿增益光纤轴向逐

渐减弱,纤芯温升最高点(高温易损点)在泵浦光进入的光纤端面;随着辐照剂量的增加,增益光纤内纤芯温升整体逐渐增大,并且纤芯温升最高点也由泵浦光进入的光纤端面逐渐转移至3~5 m的位置。

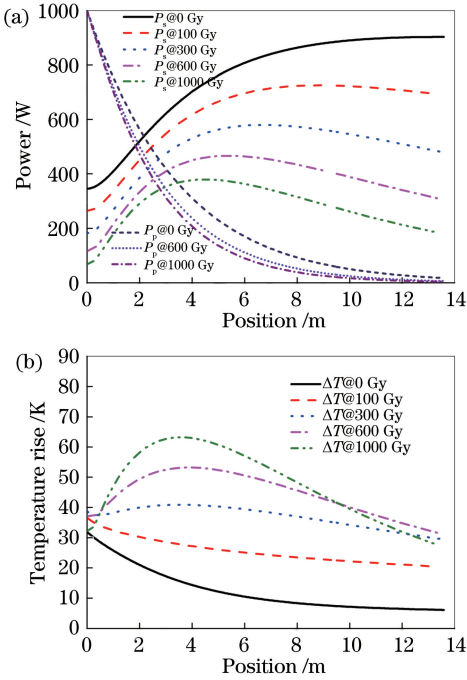


图5 前向泵浦激光器增益光纤的特性曲线。

(a)信号光和泵浦光功率;(b)纤芯温升

Fig. 5 Characteristic curves of gain fiber in forward-pumped lasers. (a) Power of signal light and pump light; (b) temperature rise in the fiber core

图6和图7所示为双端泵浦和后向泵浦时,激光器中增益光纤内信号光和泵浦光的功率及纤芯温升随增益光纤位置的分布情况。与图5类似,从整体上来看,随着辐照剂量的增加,增益光纤内信号光和泵浦光的功率整体减小,纤芯温升增大;具体来看,增益光纤内泵浦光功率分布规律基本不变,信号光功率和纤芯温升随光纤位置的分布情况发生了明显的变化,然而纤芯温升最高点位置却没有发生转移。

以 γ 射线辐射剂量为0 Gy和1000 Gy两种情形为例,三种泵浦方式下纤芯最高温升以及纤芯温升最高点位置如表3所示。未受 γ 射线作用时,双端泵浦光纤激光器增益光纤内纤芯最高温升只有21.94 K,为三种泵浦方式最低;受1000 Gy剂量的 γ 射线作用后,前向泵浦和双端泵浦方式光纤激光器增益光纤内纤芯最高温升相差不多,但是后向泵浦光纤激光器增益光纤内纤芯最高温升达到了86.79 K,其比另外两种情形还高了近23 K。尽管

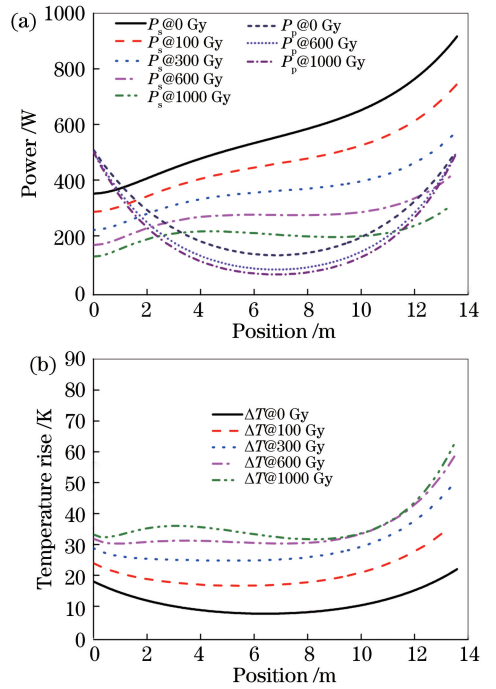


图6 双端泵浦激光器增益光纤的特性曲线。

(a)信号光和泵浦光功率;(b)纤芯温升

Fig. 6 Characteristic curves of gain fiber in bi-direction pumped lasers. (a) Power of signal light and pump light; (b) temperature rise in the fiber core

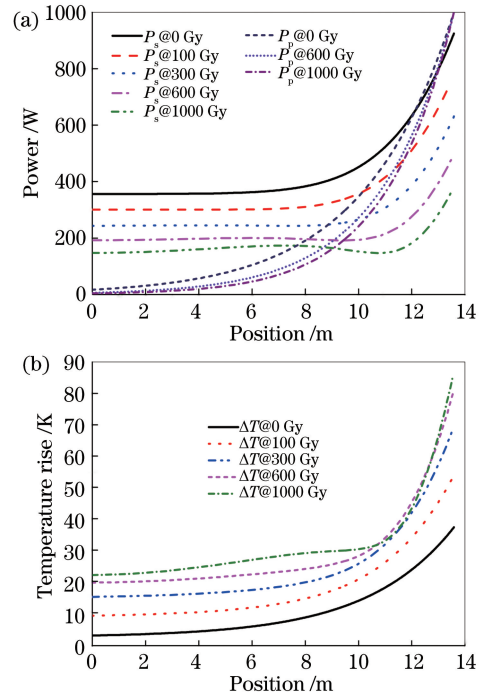


图7 后向泵浦激光器增益光纤的特性曲线。

(a)信号光和泵浦光功率;(b)纤芯温升

Fig. 7 Characteristic curves of gain fiber in backward-pumped lasers. (a) Power of signal light and pump light; (b) temperature rise in the fiber core

3.3 节的分析结果显示在受到辐射作用时采用后向泵浦方式的光纤激光器可以获得最高功率的输出,

但将光纤激光器应用到辐射环境中时,对激光器的泵浦方式及热效应管理也需要做好设计。

表 3 纤芯最高温升及其位置

Table 3 Max temperature rise and the corresponding position

Radiation dose /Gy	Forward pumping		Bi-direction pumping		Backward pumping	
	Max ΔT /K	Position /m	Max ΔT /K	Position /m	Max ΔT /K	Position /m
0	32.01	0	21.94	13.6	37.35	13.6
1000	63.27	3.51	64.94	13.6	86.79	13.6

4 结 论

通过抓住增益光纤的辐致损耗这一光纤激光器性能最主要的影响因素,初步建立了辐射环境表征参数与光纤激光器增益光纤输出功率、热效应和温度分布的关系模型。数值模拟仿真了辐致损耗、辐射剂量、光纤长度以及泵浦方式对激光器输出功率的影响,并对不同泵浦方式下光纤激光器增益光纤内的热效应开展了分析。相关结果表明:增益光纤的辐致损耗对光纤激光器的功率特性有着较大的影响,与激光器的输出功率具有负相关性;辐射剂量、增益光纤的长度也会对激光器的输出功率产生影响,但其本质可以归结为辐射剂量、光纤长度的变化导致了光纤总辐致损耗的变化;泵浦方式对激光器的输出功率、增益光纤内泵浦光和信号光功率以及纤芯温升随增益光纤位置的分布情况也会造成显著的影响。基于以上的研究结果,为确保光纤激光器能够在辐射环境中安全、稳定的运行,首先应采用耐辐射的光纤器件,同时需要根据辐射环境参数、任务周期、光纤器件的辐射响应特性,对激光器增益光纤长度、泵浦方式等因素综合考虑,进行优化设计。

参 考 文 献

[1] Limpert J, Roser F, Klingebiel S, et al. The rising power of fiber lasers and amplifiers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(3): 537-545.

[2] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives [Invited] [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(11): B63-B92.

[3] Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: a review[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 219-241.

[4] Stark M. Over 50 percent wall-plug efficiency fiber laser[J]. Laser Technik Journal, 2016, 13(2): 14-16.

[5] Chen X L, Lou F G, He Y, et al. Home-made

10 kW fiber laser with high efficiency [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0336001.

陈晓龙, 楼风光, 何宇, 等. 高效率全国产化 10 kW 光纤激光器[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0336001.

[6] Chen W, Yang H L, Guo X Q, et al. The research status and challenge of space radiation physics and application [J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(10): 978-989.

陈伟, 杨海亮, 郭晓强, 等. 空间辐射物理及应用研究现状与挑战 [J]. 科学通报, 2017, 62(10): 978-989.

[7] Girard S, Kuhnhehn J, Gusarov A, et al. Radiation effects on silica-based optical fibers: recent advances and future challenges [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, 60(3): 2015-2036.

[8] Huang H Q, Zhao N, Chen G, et al. Effects of γ -radiation on Yb-doped fiber[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(20): 200201.

黄宏琪, 赵楠, 陈瑰, 等. γ 射线辐照对掺 Yb 光纤材料性能的影响 [J]. 物理学报, 2014, 63(20): 200201.

[9] Xing Y B, Huang H Q, Zhao N, et al. Pump bleaching of Tm-doped fiber with 793 nm pump source[J]. Optics Letters, 2015, 40(5): 681-684.

[10] Chi J J, Jiang S Q, Zhang L, et al. Experimental study on radiation performance of fiber lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(6): 061406.

池俊杰, 姜诗琦, 张琳, 等. 光纤激光器辐照性能实验研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(6): 061406.

[11] Wu W D, Yu T, Tao M M, et al. Experimental investigation of gamma-ray irradiation effect on Tm-doped fibers[J]. Chinese Optics, 2018, 11(4): 610-614.

吴闻迪, 余婷, 陶蒙蒙, 等. 掺铥光纤 γ 射线辐照效应实验研究 [J]. 中国光学, 2018, 11(4): 610-614.

[12] Chen H W, Tao M M, Zhao H C, et al. Experimental investigations on laser power characteristics influenced by gamma-ray irradiated gain fiber [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1201005.

- 湛鸿伟, 陶蒙蒙, 赵海川, 等. γ 射线辐照增益光纤影响激光器功率特性实验 [J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1201005.
- [13] Shi C, Tao R M, Wang X L, et al. New progress and phenomena of modal instability in fiber lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0201004.
史尘, 陶汝茂, 王小林, 等. 光纤激光模式不稳定的新现象与新进展 [J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0201004.
- [14] Li X W, Yu C L, Shen H, et al. Thermo-optic effect and mode instability threshold characteristics of high-power fiber laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1101001.
李学文, 于春雷, 沈辉, 等. 高功率光纤激光热光效应及模式不稳定阈值特性研究 [J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1101001.
- [15] Hu Z T, He B, Zhou J, et al. Research progress in thermal effect of high power fiber lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 080002.
胡志涛, 何兵, 周军, 等. 高功率光纤激光器热效应的研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 080002.
- [16] Yang W Q, Hou J, Song R, et al. Theoretical analysis of two-stage pumping technology for high power fiber lasers[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(8): 084210.
杨未强, 侯静, 宋锐, 等. 高功率光纤激光器二级抽运技术的理论分析 [J]. 物理学报, 2011, 60(8): 084210.
- [17] Lezius M, Predehl K, Stower W, et al. Radiation induced absorption in rare earth doped optical fibers [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2012, 59(2): 425-433.
- [18] Luo Y, Wang X L, Zhang H W, et al. Amplified spontaneous emission characteristics and locations of high temperature vulnerable point in fiber amplifiers [J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(23): 234206.
罗亿, 王小林, 张汉伟, 等. 光纤放大器放大自发辐射特性与高温易损点位置 [J]. 物理学报, 2017, 66(23): 234206.
- [19] Girard S, Marcandella C, Morana A, et al. Combined high dose and temperature radiation effects on multimode silica-based optical fibers [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, 60(6): 4305-4313.