

高功率光纤激光器反向光放大和损伤特性数值分析

盛 泉¹, 司汉英², 安建民³, 张海伟⁴, 张钧翔¹, 丁 宇², 李升才⁵, 史 伟¹, 姚建铨¹

1. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;
2. 光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308;
3. 空装驻天津地区第三军事代表室, 天津 300308;
4. 天津理工大学 电气电子工程学院, 天津 300384;
5. 陆军研究院装甲兵研究所, 北京 100072)

摘 要: 利用速率方程模型对主振荡-功率放大器结构的 1 μm 波段掺镱 (Yb) 高功率光纤激光器中存在连续波反向信号光时的功率特性进行了理论分析, 结果显示反向信号光功率会被高功率激光放大器所明显放大, 10 kW 级的光纤激光器中, 100 W 的反向信号经过放大器后功率会被放大至 kW 量级; 与此同时, 反向信号放大过程对反转粒子数的消耗会导致激光器的正向输出功率的严重下降。另外, 反向信号放大也会导致放大器输出端的激光功率过强, 加剧泵浦吸收和受激发射过程, 增加该处的热负载、导致温度大幅上升 100 $^{\circ}\text{C}$ 以上, 对稳定性产生潜在影响。反向信号导致振荡器提供的正向种子光功率波动和下降时, 正向信号不能充分饱和有源光纤中的增益, 会进一步加强反向信号在主放大级中的放大作用, 进而对系统造成更严重的影响。提高正向种子光功率、增强正向信号对激光增益的饱和作用, 有助于抑制反向信号的放大过程, 但需综合考虑种子源稳定性、热负载、热致模式不稳定和受激拉曼散射等因素合理选择种子光功率。

关键词: 光纤激光器; 光纤放大器; 速率方程; 反向信号放大; 损伤阈值

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200009

Numerical analysis on backward light amplification and damage in high-power fiber laser

Sheng Quan¹, Si Hanying², An Jianmin³, Zhang Haiwei⁴, Zhang Junxiang¹, Ding Yu²,
Li Shengcai⁵, Shi Wei¹, Yao Jianquan¹

1. School of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, Tianjin 300308, China;
3. Air-loading The Third Military Representative Room in Tianjin Area, Tianjin 300308, China;
4. School of Electrical and Electronic Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;
5. Armored Forces Research Institute of Army Research Academy, Beijing 100072, China)

Abstract: The amplification of continuous-wave backward signal in 1 μm high-power master-oscillator-power-amplifier based Yb-doped fiber laser was investigated using rate equation model. The results show that the backward light power would be amplified significantly by the high-power amplifier. The 100 W backward signal from the output end of the fiber amplifier can be amplified to up to kW level. Meanwhile, the amplification of

收稿日期: 2020-01-09; 修订日期: 2020-02-18

基金项目: 山东省重点研发计划项目 (2017CXCC0808); 重点实验室基金 (JCKY2019210C051)

作者简介: 盛泉 (1985-), 男, 副教授, 主要从事单频光纤激光器和固体拉曼激光器方面的研究。Email: shengquan@tju.edu.cn

backward signal can consume the population inversion, saturate laser gain and thus decrease the laser output power seriously. Furthermore, the backward signal amplification would result in a much higher laser intensity at the incident end of the amplifier gain fiber, where the highest pump power existed. The temperature at the incident end of the fiber can be 100 °C higher than that without backward signal. The higher laser intensity at the incident end could break the pump absorption saturation, and enhance the rates of pump absorption and stimulated emission a lot, hence increased the thermal load and the temperature significantly. Since the backward signal gain was determined by the saturation of population inversion by the forward seed, the power fluctuation of oscillator caused by the amplified backward signal may aggravate the backward signal amplification, and further increase the risk of damage. Higher forward seed power resulted in stronger saturation of the laser gain in the active fiber, which could suppress the backward signal amplification effectively. However, higher seed power put forwards much complex requirements to laser oscillator, and the thermal load in the active fiber of the laser amplifier would be more concentrated, which made the thermal management more difficult. Furthermore, with higher seed power, the stimulated Raman scattering and thermal induced transverse mode instability are more likely to occur. Therefore, it is important to optimize the seed laser power based on a comprehensive consideration of the above issues, and to prevent the backward light from coupling into the fiber amplifier.

Key words: fiber laser; fiber amplifier; rate equation; backward signal amplification; damage threshold

0 引言

高功率光纤激光器在热管理、转换效率以及成本方面相比固体激光器具有优势, 光纤自身柔性传输的特性给系统集成和应用也带来了便利, 在先进工业制造方面具有极其重要的应用^[1-2]。目前光纤激光器领域的领头羊 IPG 公司基于掺镱 (Yb) 有源光纤的 1 μm 光纤激光器产品准单模单纤输出功率已超过 10 kW^[3], 国内很多机构也开展高功率光纤激光器方面的工作^[4-8], 其中中国工程物理研究院和中国科学院上海光学精密机械研究所先后报道了单纤激光输出功率超过 10 kW 的实验结果^[6-7]。受光纤光栅等器件的损伤阈值所限, 高功率光纤激光器多采用主振荡功率放大器 (MOPA) 结构, 即由振荡器产生一定功率的种子光, 再经过一级或多级高功率放大器放大后得到万瓦级激光输出。由于高功率放大器泵浦功率及其提供的激光增益极高, 一旦加工对象表面具有较高的反射率, 其反射的激光返回放大器链路的纤芯中反向传输, 将得到放大形成逐渐积累增强反向的信号光。反向信号光一方面消耗反转粒子数、引起激光器输出功率的波动和下降; 另一方面其功率的积累将导致放大级输入端的泵浦吸收和受激辐射过程增强, 加剧单位长度上的热负载, 过高的反向光功率本身也极易造成光纤器件和泵浦源的损伤, 严重时甚至导致整个放大链路的烧毁。由于光纤激光系统本身很高的输出功率, 事

实上很难在激光器输出端设置隔离等针对反向光的防护措施。因此, 建立反向光在高功率放大器中放大过程的理论模型, 分析反向光对系统运转状态的影响, 对于高功率光纤激光器的设计优化具有重要的意义。

文中, 笔者采用速率方程模型对高功率光纤激光系统中反向回光放大过程分别进行数值模拟, 得到反向光功率放大特性分布及其对正向激光输出功率的影响, 结合石英光纤的损伤阈值讨论了可能导致系统损伤的因素。

1 理论模型

首先确定高功率光纤激光器的基本结构模型。表 1 给出了典型的万瓦级光纤激光系统相关文献报道参数, 激光器的基本结构均为一级振荡器+一级放大器的 MOPA 结构, 振荡器谐振腔由光纤光栅构成, 输出功率 170 W~1 kW 不等, 经放大器放大后达到 10 kW, 振荡器和放大器均采用双包层有源光纤, 包层泵浦。泵浦波长方面, IPG 公司曾使用掺 Yb 光纤激光器的 1018 nm 输出对放大器进行级联泵浦实现单纤 10 kW 输出, 与常用的 976 nm 半导体激光器 (LD) 泵浦方式相比, 1018 nm 级联泵浦具有更低的量子亏损, 热效应相对较轻, 被认为是实现单纤高功率输出的关键, 但随着高功率光纤激光器研究的不断深入, 研究人员

表 1 典型万瓦光纤激光器系统参数

Tab.1 Parameters of typical 10-kW-level fiber laser systems

Parameters	IPG Photonics ^[3]	CAEP report ^[7]	SIOM report ^[7]
Output power/kW	10	10.6	10.14
Structure		Oscillator and one-stage amplifier	
Laser wavelength/nm	1 070	1 080	1 070
Seed power	1 kW	1 kW	170 W
Fiber core size and lengths	30 μm, 15 m	30/900 μm, 25 m	30/900 μm, 18 m
Pump scheme	1 018 nm, 12 690 W, backward pumping	976 nm, 11 500 W, forward pumping	976 nm, 11 359 W, bidirectional pumping

发现 1018 nm 泵浦主要解决的是泵浦源亮度问题,即光束质量较高的 1018 nm 激光提高了能够耦合进入有源光纤的最大泵浦功率,随着 LD 以及合束器等无源器件工艺的进步,直接使用 976 nm LD 作为泵浦源也能够为系统提供足够的泵浦功率,其相对 1018 nm 级联泵浦方式略高的热负载对系统运行的稳定性也不会产生影响,后续的高功率光纤激光器相关报道中多采用 976 nm LD 直接对激光器进行泵浦,因此文中

仿真计算中也采用 976 nm LD 半导体激光器作为泵浦源,端面耦合,正向包层泵浦,图 1 给出了掺镱光纤放大器的示意图。

图 1 所示的掺镱光纤放大器中,其上能级反转粒子数密度、泵浦光、信号光随时间 t 和增益光纤位置 z 的变化规律可以用如下速率方程进行描述^[8-11],此处 z 以有源光纤的正向起点为原点:

$$\frac{\partial N_2(z,t)}{\partial t} = \frac{\lambda_p \Gamma_p}{hcA} [\sigma_{pa} N_1(z,t) - \sigma_{pe} N_2(z,t)] \cdot [P_p^+(z,t) + P_p^-(z,t)] - \frac{N_2(z,t)}{\tau} + \frac{\Gamma_s \lambda_s}{hcA} [\sigma_{sa}(\lambda_s) N_1(z,t) - \sigma_{se}(\lambda_s) N_2(z,t)] \cdot [P_s^+(z,t, \lambda_s) + P_s^-(z,t, \lambda_s)] \quad (1)$$

$$N = N_1(z,t) + N_2(z,t) \quad (2)$$

$$\pm \frac{\partial P_s^\pm(z,t, \lambda_s)}{\partial z} + \frac{1}{v} \frac{\partial P_s^\pm(z,t, \lambda_s)}{\partial t} = \Gamma_s [\sigma_{se}(\lambda_s) N_2(z,t) - \sigma_{sa}(\lambda_s) N_1(z,t)] \cdot P_s^\pm(z,t, \lambda_s) - \alpha_s P_s^\pm(z,t, \lambda_s) \quad (3)$$

$$\pm \frac{\partial P_p^\pm(z,t)}{\partial z} + \frac{1}{v_p} \frac{\partial P_p^\pm(z,t)}{\partial t} = -\Gamma_p [\sigma_{pa} N_1(z,t) - \sigma_{pe} N_2(z,t)] \cdot P_p^\pm(z,t) - \alpha_p P_p^\pm(z,t) \quad (4)$$

式中: N 为 YDFA 所用增益光纤的掺杂浓度; $N_1(z,t)$ 为基态粒子密度随时间 t 和增益光纤位置 z 的变化函数; $N_2(z,t)$ 为上能级反转的粒子数密度随时间 t 、增益光纤位置 z 的变化函数; Γ_s 和 Γ_p 为 ASE 光和泵浦光的重叠因子; A 为增益光纤的模场面积; σ_{pa} 和 σ_{pe} 分别为泵浦光的吸收和发射截面; σ_{sa} 和 σ_{se} 分别表

示信号光的吸收和发射截面; c 为真空中的光速; τ 为荧光寿命; α_s 和 α_p 分别为泵浦光的损耗系数; h 为普朗克常数; “+”和“-”分别为正向和反向传输;各物理量数值见表 2。对连续波反向回光进行分析时,系统处于稳态,公式 (1)~(4) 中各物理量对时间的导数项均为零,结合放大器边界条件 (5)~(6) 对方程进行求

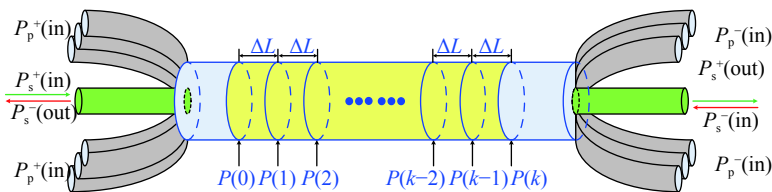


图 1 掺镱光纤放大器 (YDFA) 理论模型示意图

Fig.1 Theoretical model of the ytterbium-doped fiber amplifier (YDFA)

表 2 模拟仿真所用参数

Tab.2 Parameters adopted in the calculation

Parameters			Parameters		
Parameters	Value	Parameters	Value	Parameters	Value
λ_p/nm	Pump wavelength	976	λ_s/nm	Signal wavelength	1 080
Γ_p	Signal overlap efficiency	0.85	Γ_s	Signal overlap efficiency	0.85
$R_{\text{core}}/\mu\text{m}$	Core diameter	30	$R_{\text{cladding}}/\mu\text{m}$	Clad diameter	900
$\sigma_a(\lambda_p)/\text{m}^2$	Pump absorption cross section	8.5×10^{-25}	$\sigma_a(\lambda_s)/\text{m}^2$	Pump absorption cross section	8.5×10^{-26}
$\sigma_e(\lambda_p)/\text{m}^2$	Pump emission cross section	8.2×10^{-25}	$\sigma_e(\lambda_s)/\text{m}^2$	Pump emission cross section	9.9×10^{-26}
$h/J \cdot \text{s}^{-1}$	Planck constant	6.626×10^{-34}	$c/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Light speed	3×10^8
N/m^{-3}	Yb^{3+} doping concentration	1.3×10^{26}	τ/ms	Upper laser level lifetime	0.84

解,即可获得光纤激光器中上能级粒子数密度、泵浦光功率以及正向和反向信号光功率随增益光纤位置的变化规律。边界条件(5)~(6)中, P_1 和 P_2 分别表示正向和反向注入的泵浦光功率; P_3 和 P_4 分别表示正向和反向注入的、中心波长为 λ_s 的信号光功率,其余波长对应功率为零。

$$P_p^+(0) = P_1, P_p^-(L) = P_2 \quad (5)$$

$$P^+(0, \lambda_s) = P_3, P^-(L, \lambda_s) = P_4 \quad (6)$$

参考表 1 中相关报道,有源光纤芯径取 $30 \mu\text{m}$,另外高功率系统中为避免高泵浦吸收使热负载过于集中,应采用较小的芯包比,取包层直径 $900 \mu\text{m}$ 。考虑高功率光纤激光系统多工作于 $1070\sim 1080 \text{ nm}$ 波长,进行反向光模拟时取正向和反向信号光波长均为 1080 nm ,计算中代入相应的受激发射截面和受激吸收截面。计算中所用的相关参数数值如表 2 所示。

2 计算结果和讨论

基于上一节中的速率方程模型计算光纤放大器中泵浦吸收和激光放大过程,结果如图 2 所示,入射泵浦功率 $P_p(0)$ 为 11.8 kW ,信号光功率 $P_s^+(0)$ 为 1 kW 时, 20 m 长有源光纤对于入射的 976 nm 泵浦光吸收 $\sim 13 \text{ dB}$,经放大后的 1080 nm 信号光输出功率达到 10.24 kW ,斜效率 83% ,与相关文献报道中的仿真和实验结果相符^[6-7],验证了模型的合理性,后续采用此模型进一步分析放大器中的反向回光放大过程。

在前述模型中,在 $z=20 \text{ m}$ 处引入一反向的 P_s^- ,计算其在有源光纤中的放大情况。反向信号的来源可能是高功率光纤激光器自身输出被反射或其他高功率连续波激光器所提供,因此,其波长、发射截面和吸收截面均取与正向信号一致。图 3 给出固定输入泵

浦功率 $P_p(0)=11.8 \text{ kW}$,正向种子光功率 $P_s^+(0)=1 \text{ kW}$ 时, $0\sim 500 \text{ W}$ 范围内不同初始功率的反向信号光在有源光纤中的放大过程。可以看出,反向信号光在有源光纤中反向传输的过程中被逐渐放大,接近入射端处反向信号光被放大的速度更快,即反向信号的放大主要实在接近有源光纤入射端实现的,这是因为入射端

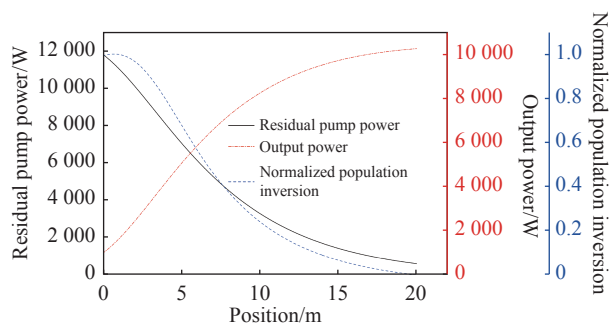


图 2 光纤放大器正向信号、泵浦光功率和反转粒子数随光纤位置 z 向的变化 ($P_p(0)=11.8 \text{ kW}$, $P_s^+(0)=1 \text{ kW}$)

Fig.2 Forward signal, pump power and normalized population inversion of fiber amplifier as functions of fiber position z ($P_p(0)=11.8 \text{ kW}$, $P_s^+(0)=1 \text{ kW}$)

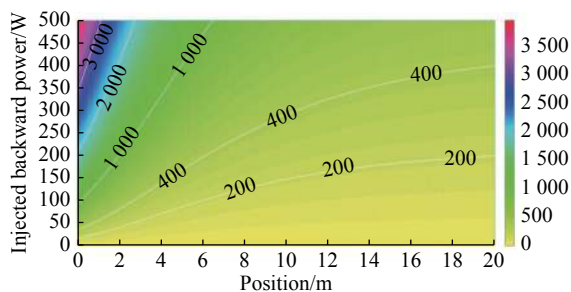


图 3 不同初始功率的连续波反向信号在有源光纤中的放大过程 ($P_p(0)=11.8 \text{ kW}$, $P_s^+(0)=1 \text{ kW}$)

Fig.3 Amplification of different incident backward powers in the active fiber ($P_p(0)=11.8 \text{ kW}$, $P_s^+(0)=1 \text{ kW}$)

吸收泵浦功率较高, 反转粒子数较大, 能提供更高的增益。

经过有源光纤放大后到达其输入端的反向信号光功率随初始反向信号光功率的变化关系如图 4。可以看出, 在反向注入功率 500 W 时, 放大后的反向光功率可接近 4 kW, 如此高的激光功率经过极易造成信号泵浦合束器和振荡器光纤光栅的损伤, 也有可能经过合束器进入 LD 泵浦源, 造成泵浦源的损伤, 即使在初始反向功率 100 W 和 10 W 时, 放大后到达光纤输入端的反向功率也会分别达到 1.05 kW 和~110 W。反向信号的存在不仅会在经有源光纤放大后形成高功率反向光, 成为系统损伤的隐患; 另一方面, 即使系统没有发生损伤, 反向信号对反转粒子数的提取消耗也会导致正向输出功率的下降, 图 4 同时给出正向信号输出功率随注入反向信号功率的变化关系, 随着反向注入回光功率从 0 增加到 500 W 时, 放大器的输出信号光功率从 10.24 kW 降至~7 kW。

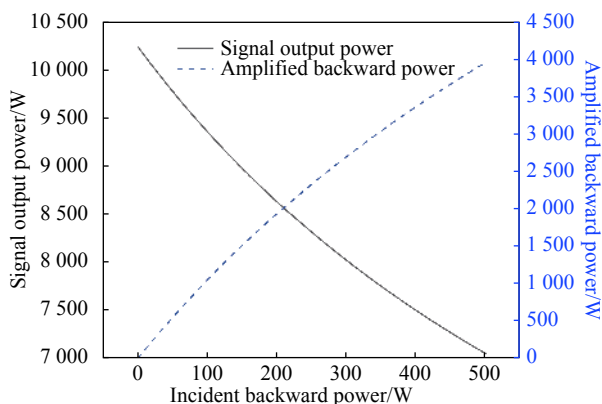


图 4 不同初始功率反向信号在有源光纤中的放大结果和对输出功率的影响 ($P_p(0)=11.8$ kW、 $P_s^-(0)=1$ kW)

Fig.4 Signal output power and amplified backward power as functions of incident backward power ($P_p(0)=11.8$ kW, $P_s^-(0)=1$ kW)

根据速率方程能够进一步求得有源光纤中各处纵向单位长度上的热负载, 结果如图 5 所示。从图中可以看出, 有源光纤内部单位长度热负载最高处并不是泵浦功率最高的放大器有源光纤输入端, 而是在其后一定位置。这主要是由于输入端的信号光功率并不很高, 受激发射过程的速率相对较低, 其对上能级反转粒子的提取效率有限, 从而限制了泵浦光的吸收, 即泵浦吸收饱和。随着信号光在有源光纤中得到放大, 受激发射过程的强度增大, 热负载也相应上升,

其变化趋势与图 2 中剩余泵浦光曲线的变化率相符。

当存在反向信号时, 反向信号经放大到达放大器输出端时具有较高的功率, 会增加泵浦功率最高的放大器输出端的受激吸收和受激发射过程的速率, 加剧热负载。基于热负载分布的计算结果, 结合热方程模型计算不同初始反向信号情况下有源光纤内部纵向温度分布趋势, 计算结果如图 6 所示。可以看出, 存在反向信号时, 放大器的输入端, 也即泵浦合束器与有源光纤熔接点处的温度明显上升, 给激光器的稳定运转带来隐患。

通过上述分析可知, 反向信号在有源光纤中的放大可能引起输出功率下降甚至系统的损伤, 因此应尽量避免。直观上, 正向的种子光功率越高, 对于反转粒子数的提取越充分, 在竞争中优势更明显, 则反向

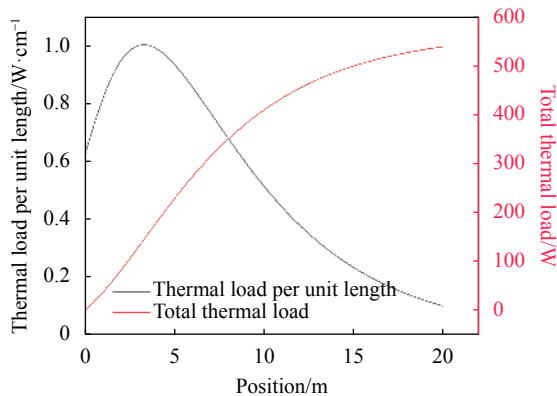


图 5 有源光纤内部单位长度产热负载及总热负载 ($P_p(0)=11.8$ kW、 $P_s^-(10)=1$ kW)

Fig.5 Thermal load per unit length in the gain fiber and the total thermal load ($P_p(0)=11.8$ kW, $P_s^-(10)=1$ kW)

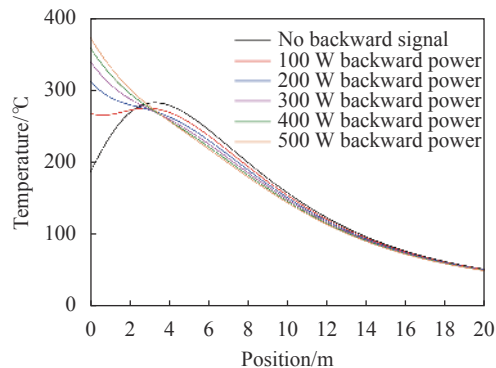


图 6 不同反向功率下有源光纤内部纵向温度分布规律 ($P_p(0)=11.8$ kW、 $P_s^-(10)=1$ kW)

Fig.6 Temperature distribution with different backward powers in the active fiber ($P_p(0)=11.8$ kW, $P_s^-(10)=1$ kW)

光得到放大增益越低。为此,计算正向种子光功率 $P_s^+(0)$ 在 500~1500 W 范围内功率 10 W 的反向信号的放大过程,如图 7。可以看出,放大器输入端处的反向回光功率会随着正向种子功率的增加而降低,而正向种子光功率降至 500 W 时,放大后的反向光功率超过 200 W,相比正向种子光 1 kW 时增加了一倍以上。因此,在保证系统稳定性的和效率的前提下,选择较高的振荡器输出种子光功率有助于抑制反向回光的放大。实际工作中,振荡器输出的种子光功率的选择还需综合考虑振荡器稳定性、光纤光栅的功率承受能力、放大器有源光纤输入端热负载以及受激拉曼散射(SRS)等因素。

连续波激光作用下石英光纤的实际损伤阈值鲜有实验报道,国防科技大学的研究人员通过理论计算认为 30 μm 芯径的光纤所能承受的最高功率为 15.9 kW, 进一步增加激光的功率应选择更大芯径的光纤^[12]。根据前文的计算结果,连续波反向回光放大并不会使放大器有源光纤中产生相对没有反向信号时更高的功率密度,正向和方向的总功率之和仍低于损伤阈值。但是,被放大的反向光会明显增加振荡器光纤光栅处的激光功率密度,而光纤光栅的损伤阈值远低于石英光纤,目前商用高功率光纤光栅一般标称承受功率能力为 2-3 kW, 如光纤光栅功率处理能力的余量较小,反向光放大导致振荡器光纤光栅发生损伤的风险也较大。根据图 7 的计算结果可知,一旦反向回光放大导致振荡器所提供的正向种子光信号发生波动下降,反向信号在有源光纤中将得到更高的增益,到达放大器输入端的反向功率会进一步上升,对

系统带来更大的损伤风险。

3 结 论

通过速率方程模型对 MOPA 结构的 10 kW 级高功率光纤激光器中存在反向回光信号时正向和方向光的功率放大特性进行数值分析,结果显示连续波反向信号会被放大器所明显放大,反向信号放大对反转粒子数的消耗会影响激光器的输出功率。考虑光纤和器件的损伤阈值,存在反向回光放大时可能导致 MOPA 系统中振荡器光纤光栅损伤。反向信号在放大器有源光纤中得到的放大增益受正向种子信号对反转粒子数的饱和影响,提高正向信号光功率有助于对反向信号放大的抑制,而一旦反向信号造成振荡器损伤或引起功率波动,反向信号的放大过程会被进一步加强,带来更严重的损伤风险。

参考文献:

[1] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives [J]. *J Opt Soc Am B*, 2010, 27: B63-92.

[2] Shi W, Fang Q, Zhu X, et al. Fiber lasers and their applications [J]. *Appl Opt*, 2014, 53: 6554-68.

[3] Stiles E. New developments in IPG fiber laser technology[C]// Proc 5th Int Workshop Fiber Lasers, 2009.

[4] Fang Q, Li J, Wei Shi, et al. 5 kW near-diffraction-limited and 8 kW high-brightness monolithic continuous wave fiber lasers directly pumped by laser diodes [J]. *IEEE Photon J*, 2017, 9: 1506107.

[5] Wang Biao, Pang Lu, Yi Yongqing, et al. 3.2 kW laser output by domestic 25/400 μm Yb-doped fiber [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2019, 48: 0706009. (in Chinese)

王标, 庞璐, 衣永青, 等. 国产 25/400 μm 掺镱光纤实现 3.2 kW 激光输出[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48: 0706009.

[6] Lin H, Xu L, Li C, et al. 10.6 kW high-brightness cascade-end-pumped monolithic fiber lasers directly pumped by laser diodes in step-index large mode area double cladding fiber [J]. *Results in Physics*, 2019, 14: 102479.

[7] Chen X, Lou F, He Y, et al. Home-made 10 kW fiber laser with high efficiency [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 423-425.

[8] Ma Jianli, Jiang Shiqi, Yu Miao, et al. kW fiber laser oscillator based on wavelength locking [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2016, 45(11): 1105002. (in Chinese)

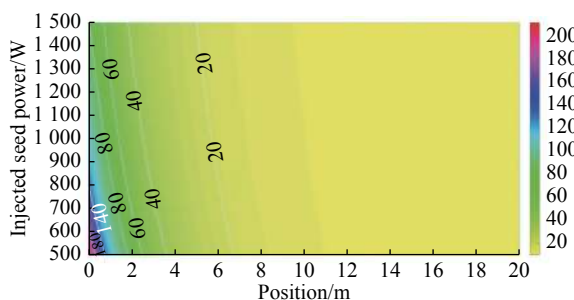


图 7 不同正向种子光功率时有源光纤中反向光功率的放大过程

($P_p(0)=11.8 \text{ kW}$, $P_s^-(10)=10 \text{ W}$)

Fig.7 Amplification of backward signal in the active fiber with different forward signal powers($P_p(0)=11.8 \text{ kW}$, $P_s^-(10)=10 \text{ W}$)

- 马建立, 姜诗琦, 于森, 等. 基于波长锁定泵浦单振荡级千瓦光纤激光器[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(11): 1105002.
- [9] Nilsson J, Paschotta R, Caplen J E, et al. Yb³⁺-ring doped fiber for high-energy pulse amplification [J]. *Opt Lett*, 1997, 22: 1092-1094.
- [10] Paschotta R, Nilsson J, Tropper A C, et al. Ytterbium-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1997, 33: 1049-1056.
- [11] Wang Y, Po H. Dynamic characteristics of double-clad fiber amplifiers for high-power pulse amplification [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(10): 2262-2270.
- [12] Zhu J, Zhou P, Ma Y, et al. Power scaling analysis of tandem-pumped Yb-doped fiber lasers and amplifiers [J]. *Optics Express*, 2011, 19(19): 18645-18654.