

基于反抛物线型光纤的 TE_{01} 和 TM_{01} 模式输出激光器

刘儒雅, 汤敏, 曹敏, 牟月安, 简伟, 任国斌*

北京交通大学全光网及现代通信网教育部重点实验室光波技术研究所, 北京 100044

摘要 提出一种反抛物线型掺铒光纤, 该光纤可以实现二阶模式组中简并矢量模式的有效分离。将其作为光纤激光器的增益介质, 采用数值方法分析光纤中铒离子掺杂分布、铒离子掺杂浓度、光纤长度和抽运光功率对掺铒光纤激光器输出模式的影响。通过在光纤不同环形区域内掺杂铒离子, 可以实现 TE_{01} 模式或 TM_{01} 模式的单独输出, 并且激光器的斜率效率分别高达 67.4% 和 63.5%, 输出模式纯度分别高达 99.97% 和 99.99%。所提的基于反抛物线型掺铒光纤的激光器具有斜率效率高、输出模式纯度高的优势, 该光纤激光器可应用于高功率激光器、光纤通信和光纤传感等领域。

关键词 激光器; 光纤激光器; 掺杂分布; 斜率效率; 模式纯度

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0501001

Anti-Parabolic-Fiber-Based Laser with TE_{01} and TM_{01} Mode Output

Liu Ruya, Tang Min, Cao Min, Mi Yuean, Jian Wei, Ren Guobin*

Key Laboratory of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network of Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract An anti-parabolic erbium-doped fiber is proposed to effectively separate the degenerate vector modes in the second-order mode group. The proposed fiber is used as the gain medium of a laser, and the effects of erbium-dopant distribution, erbium-dopant concentration, fiber length, and pump power upon the output mode of the erbium-doped fiber laser are analyzed through numerical investigation. The TE_{01} or TM_{01} modes are obtained separately by doping erbium in different annular regions of the proposed fiber, and the slope efficiencies of the proposed fiber laser can reach 67.4% and 63.5%, with an output-mode purity reaching 99.97% and 99.99%, respectively. The proposed anti-parabolic-fiber-based erbium-doped laser has the merits of a high slope efficiency and high mode purity, and has many applications such as in high power lasers, optical-fiber communications, and optical-fiber sensing systems.

Key words lasers; fiber laser; dopant distribution; slope efficiency; mode purity

OCIS codes 140.3510; 160.5690; 140.3570

1 引 言

TE_{01} 模式和 TM_{01} 模式为光纤二阶模式组的两种矢量模式, 其中 TE_{01} 模式为角向偏振光束, TM_{01} 模式为径向偏振光束, 并且二者的模式场强度呈“面包圈”状^[1]。这两种光束具有聚焦后偏振方向保持稳定、能量高度集中等特性, 是进行微小粒子操纵的关键^[2]。 TE_{01} 模式和 TM_{01} 模式在光学镊子^[3]、粒子捕获^[4]、原子导向^[5]、材料加工^[6]、粒子加速^[7]等领域具有重要的应用价值。

现有输出 TE_{01} 模式和 TM_{01} 模式的激光器主要分为基于体光学器件的激光器和基于光纤器件的激光器。在基于体光学器件的激光器中, 体光学器件包括双锥形棱镜^[8]、双折射晶体^[9-10]、空间波片^[11]等, 该类激光器可以成功地输出 TE_{01} 模式和 TM_{01} 模式, 并且通过合理地设计激光器的结构, 可以使激光器具有较高的斜率效率和输出模式纯度。现有的报道中基于体光学器件的激光器的最高斜率效率可达 71%^[10], 输出的模式纯度可达 95%^[11], 但该类激光器的结构往往比较复杂、占地面积大、损耗较大、

收稿日期: 2018-11-19; 修回日期: 2019-01-06; 录用日期: 2019-01-28

基金项目: 国家自然科学基金(61275092)

* E-mail: gbren@bjtu.edu.cn

稳定性差。在基于光纤器件的激光器中,光纤器件主要包括布拉格光栅^[12-13]、长周期光栅^[14-15]、模式耦合器^[16-17]等,全光纤器件具有体积小、结构简单、易于制造和集成、损耗低、稳定性高等优势。然而,这类实验大部分是在激光器的谐振腔外利用光纤器件将基模转换到 TE_{01} 模式或 TM_{01} 模式,因此,该类激光器的斜率效率和输出模式纯度往往受限于模式转换效率。本文从光纤激光器的稀土掺杂光纤出发,通过设计光纤中掺杂的铒离子的分布形式,实现从光纤激光器谐振腔内直接输出 TE_{01} 模式和 TM_{01} 模式。该方法可避免模式转换对输出功率和模式纯度的影响,从而大幅提高光纤激光器的斜率效率和输出的模式纯度。

本文提出一种可实现二阶模式组中简并矢量模式有效分离的反抛物线型光纤。在该光纤的部分区域掺杂铒离子,并将其作为光纤激光器的增益介质,实现从光纤激光器中直接输出 TE_{01} 模式和 TM_{01} 模式。同时,基于该掺铒光纤,研究了抽运功率、光纤长度、铒离子掺杂浓度(粒子数浓度,下同)对模式输出功率和模式纯度的影响。

2 基本原理

2.1 反抛物线型光纤结构

为了实现光纤中简并矢量模式的有效分离(各模式之间的有效折射率差大于 10^{-4}),纤芯结构应具有较大的折射率梯度,同时其模式场也应具有较大的场梯度^[18]。反抛物线型光纤结构可实现二阶模式组中简并模式(TE_{01} 、 TM_{01} 和 HE_{21})的有效分离^[19],该光纤结构如图 1 所示。纤芯半径 r_{co} 和包层半径 r_{cl} 分别为 $3.5 \mu\text{m}$ 和 $62.5 \mu\text{m}$; $N_r = -2.15$ 为反抛物线型光纤的曲率参数,即芯层最大有效折射率与纤芯中心和包层有效折射率差的比值;光纤沿半径方向的有效折射率呈反抛物线型分布^[19],并

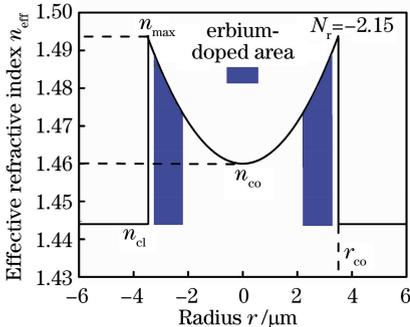


图 1 反抛物线型光纤结构图

Fig. 1 Structural diagram of anti-parabolic fiber

且 $r=0 \mu\text{m}$ 和 $r=3.5 \mu\text{m}$ 处以及包层的折射率分别为 $n_{co}=1.460$, $n_{max}=1.4938$ 和 $n_{cl}=1.444$ 。

该反抛物线型光纤支持 7 种矢量模式(HE_{11} 、 TE_{01} 、 TM_{01} 、 HE_{21} 、 HE_{31} 、 EH_{11} 和 HE_{12})的传输。图 2 所示为该光纤中二阶矢量模式间有效折射率差随波长变化关系。其中, Δ_1 、 Δ_2 及 Δ_3 分别为 TE_{01} 与 TM_{01} 、 TE_{01} 与 HE_{21} 以及 HE_{21} 与 TM_{01} 模式之间的有效折射率差。可以看出,该光纤结构中任意两个二阶模式的有效折射率差均大于 10^{-4} , 即当波长在 $1530 \sim 1565 \text{ nm}$ 范围内,该光纤结构可以实现二阶矢量模式的有效分离。

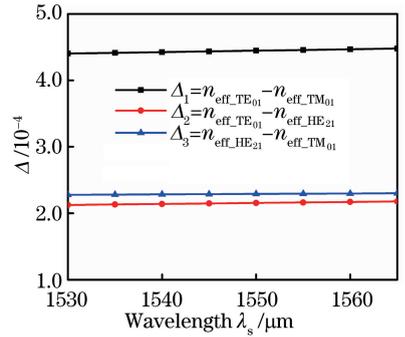


图 2 有效折射率差 Δ 与波长 λ_s 的关系

Fig. 2 Effective refractive index difference Δ as a function of wavelength λ_s

将此光纤应用到光纤激光器,选择 HE_{11} 模式作为光纤激光器的抽运模式,抽运波长 $\lambda_p = 980 \text{ nm}$; 信号光为上述光纤所支持的 7 种矢量模式,信号光波长 $\lambda_s = 1530 \text{ nm}$ 。图 3 所示为抽运模式和信号模式在光纤横截面上沿光纤半径方向的归一化功率,其中,插图二阶矢量模式归一化功率曲线局部放大图, p_{pump} 表示抽运信号。

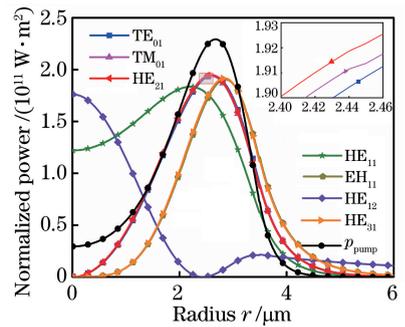


图 3 光纤横截面上的 980 nm 抽运模式和 1530 nm 信号模式沿半径方向的归一化功率分布

Fig. 3 Normalized power distributions along radius of fiber at 980 nm for pump mode and 1530 nm for signal mode

从图 3 可以看出,该光纤中各模式的功率沿光纤径向分布的区域不同,并且各模式主要分布在光

纤折射率较高的区域(HE₁₂模式除外)。同时,随着模式阶数的增加,模场逐渐向包层靠近。

选用铒离子作为反抛物线型光纤的掺杂元素。将反抛物线型掺铒光纤作为激光器的增益介质,使用波长为 980 nm 的激光抽运掺铒光纤,则可以在 1530 nm 附近获得输出激光。此外,铒离子具有很好的能量储备能力和较高的光转换效率,其光信号增益可以表示为

$$G = 4.343\Gamma LN[\sigma_e - (\sigma_a n_2 - \sigma_a)], \quad (1)$$

式中: G 为光信号的增益; Γ 为光场与铒离子分布空间的重叠系数; L 为光纤长度; N 为铒离子掺杂浓度; σ_e 和 σ_a 分别为发射截面和吸收截面; n_2 为受激离子数。抽运模式、信号模式和光纤中的掺铒分布共同影响光纤激光器上层粒子数。选择 HE₁₁ 模式为抽运模式时,由(1)式可以看出,当某一信号模式的光场与铒离子掺杂区域的重合面积较大时,该模式可获得较大的增益。因此,根据图 3 中各信号模式在光纤横截面上沿光纤径向的分布,合理地设计铒离子掺杂区域,可以使得某一模式获得较大增益,并在光纤激光器谐振腔中稳定传输并输出^[20]。

图 4 为所设计的铒离子环形均匀掺杂示意图。其中, R_{in} 为掺杂铒离子的起始半径, d 为掺铒区域的厚度,环形区域内各位置的铒离子掺杂浓度相同。

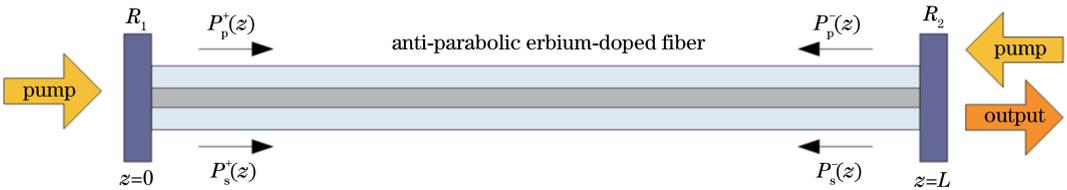


图 5 掺铒光纤激光器结构图

Fig. 5 Structural diagram of erbium-doped fiber laser

2.3 光纤激光器速率方程

激光器速率方程组可以用来分析光纤激光器中的模式竞争现象,它描述了光纤激光器谐振腔内抽运光、信号光以及粒子集居数之间的相互影响。选用 Er³⁺ 作为光纤的掺杂元素,当光纤激光器的抽运光波长为 980 nm 时,Er³⁺ 的能级可以简化为二能级系

在工艺上可以利用溶液掺杂法、气相掺杂法、气溶胶法、溶胶凝胶法等实现环形均匀的掺铒分布^[21]。

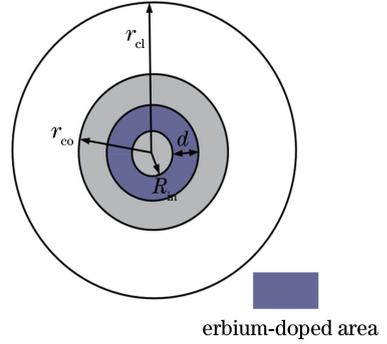


图 4 光纤横截面上的掺铒分布

Fig. 4 Schematic of erbium dopant distribution in fiber cross section

2.2 掺铒光纤激光器结构

图 5 为掺铒光纤激光器的结构示意图。其中,激光器在 $z=0$ 和 $z=L$ 处的反射系数分别为 R_1 和 R_2 ;光纤激光器的增益介质为所设计的反抛物线型掺铒光纤;光纤激光器的抽运为双向抽运; $P_p^+(z)$ 和 $P_p^-(z)$ 分别为抽运光在光纤激光器谐振腔内 z 处的正向和反向功率; $P_s^+(z)$ 和 $P_s^-(z)$ 分别为信号光在光纤激光器谐振腔内 z 处的正向和反向功率。

统^[2]。忽略放大自发辐射、相邻离子间的相互影响、抽运光和信号光在光纤中的损耗,并认为光纤激光器谐振腔内只传输一个纵模,则此时可通过求解二能级系统的速率方程组来研究掺铒光纤激光器中的模式竞争现象。为了简化计算,将光纤沿径向和纵向进行均匀分层和分段,则二能级速率方程组可表示为

$$\frac{N_{2k}}{N_{1k}} = \frac{\frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)]\sigma_{ap}\Gamma_{pk}}{h\nu_p A_k} + \sum_i \frac{[P_{si}^+(z) + P_{si}^-(z)]\sigma_{as}\Gamma_{sik}}{h\nu_s A_k}}{\frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)]\sigma_{ep}\Gamma_{pk}}{h\nu_p A_k} + \frac{1}{\tau} + \sum_i \frac{[P_{si}^+(z) + P_{si}^-(z)]\sigma_{es}\Gamma_{sik}}{h\nu_s A_k}}, \quad (2)$$

$$N_{1k}(z) + N_{2k}(z) = N, \quad (3)$$

$$\pm \frac{dP_p^\pm(z)}{dz} = \sum_k \Gamma_{pk} [\sigma_{ep} N_{2k}(z) - \sigma_{ap} N_{1k}(z)] P_p^\pm(z), \quad (4)$$

$$\pm \frac{dP_{si}^{\pm}(z)}{dz} = \sum_k \Gamma_{sik} [\sigma_{es} N_{2k}(z) - \sigma_{as} N_{1k}(z)] P_{si}^{\pm}(z), \quad (5)$$

式中： $N_{2k}(z)$ 和 $N_{1k}(z)$ 分别为光纤纵向位置 z 处的第 k 层光纤横截面的上层激光和下层激光的 Er^{3+} 集居数密度； $P_p^{\pm}(z)$ 和 $P_{si}^{\pm}(z)$ 分别为抽运光和第 i 个信号模式在位置 z 处的正向和反向功率； σ_{ap} 和 σ_{ep} 分别为抽运光的吸收截面和发射截面； σ_{as} 和 σ_{es} 分别为信号光的吸收截面和发射截面； Γ_{pk} 和 Γ_{sik} 分别为抽运光和第 i 个信号模式在第 k 层光纤横截面的归一化功率； h 为普朗克常量； A_k 为第 k 层光纤横截面的面积； τ 为 Er^{3+} 上能级平均寿命； ν_p 和 ν_s 分别为抽运光和信号光的频率。激光器的边界条件为

$$P_{si}^+(0) = R_1 P_{si}^-(0), \quad (6)$$

表 1 掺铒光纤激光器仿真参数

Table 1 Parameters for simulation of Er-doped fiber laser

Physical parameter	λ_p/nm	λ_s/nm	R_1	R_2	τ/ms	N/m^{-3}
Numerical value	980	1530	0.99	0.035	0.8	5.0×10^{25}
Physical parameter	L/m	P/W	σ_{ap}/m^2	σ_{ep}/m^2	σ_{as}/m^2	σ_{es}/m^2
Numerical value	2	0.8	2.8×10^{-25}	0	6.0×10^{-25}	5.7×10^{-25}

当光纤长度 $L=2\text{ m}$ ，抽运功率 $P=0.8\text{ W}$ ，铒离子掺杂浓度 $N=5.0 \times 10^{25}\text{ m}^{-3}$ 时，采用图4所示的铒离子掺杂分布结构，可实现光纤激光器 TE_{01} 模式的输出。其中，铒离子掺杂起始半径 $R_{in}=2.2\text{ }\mu\text{m}$ ，掺杂厚度 $d=1\text{ }\mu\text{m}$ 。图6所示为该结构参数下抽运光和信号光在光纤激光器谐振腔内各位置的功率。其中， p_{pump}^+ 和 p_{pump}^- 分别表示正向和反向抽运信号。该结构参数的光纤激光器输出 TE_{01} 模式的功率为 0.52 W ，模式纯度高达 99.97% 。该环形掺杂分布使 TE_{01} 模式在模式竞争中获得了较大增益，而其他模式获得的增益较小(功率几乎为零)，因此光纤激光器可以稳定输出 TE_{01} 模式。

研究发现，仅在一个环形区域掺杂铒离子无法输出 TM_{01} 模式，因此，本研究在两个环形区域掺杂铒离子来实现 TM_{01} 模式的输出。当 $L=2\text{ m}$ ， $P=0.8\text{ W}$ ， $N=5.0 \times 10^{25}\text{ m}^{-3}$ 时，采用如图7(a)所示的铒离子掺杂分布，可实现光纤激光器 TM_{01} 模式输出。其中，铒离子掺杂的第一个环形区域起始半径 $R_{in1}=1.8\text{ }\mu\text{m}$ ，掺杂厚度 $d_1=0.5\text{ }\mu\text{m}$ ；第二个环形区域起始半径 $R_{in2}=3.5\text{ }\mu\text{m}$ ，掺杂厚度 $d_2=1\text{ }\mu\text{m}$ 。图7(b)所示为该结构参数下抽运光和信号光在光纤激光器谐振腔内各位置的功率。该结构参数的光纤激光器输出 TM_{01} 模式的功率为 0.49 W ，模式纯度

$$P_{si}^-(L) = R_2 P_{si}^+(L). \quad (7)$$

在上述激光器速率方程组的基础上，结合激光器边界条件，则可以利用四阶龙格库塔法求解方程组，即可得出抽运光及信号光在光纤激光器谐振腔中各位置的功率^[22]。

3 数值仿真结果及分析

利用 MATLAB 软件进行掺铒光纤激光器的数值仿真，仿真参数如表1所示。其中， λ_p 和 λ_s 分别为抽运光和信号光的波长； R_1 和 R_2 分别为光纤激光器输入端和输出端反射镜的反射系数； P 为抽运光的功率。

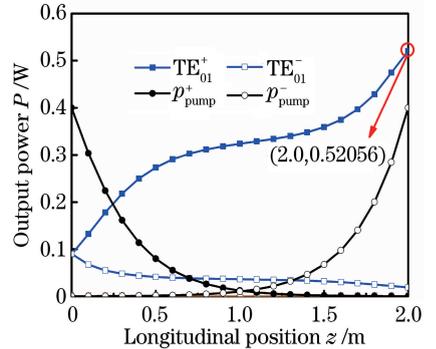


图 6 输出 TE_{01} 模式时抽运光和信号光在光纤激光器谐振腔内 z 处的功率
Fig. 6 Powers of pump and signal light as a function of z in fiber laser cavity for TE_{01} mode output

高达 99.99% 。该环形掺杂分布使 TM_{01} 模式在模式竞争中获得了较大增益，而其他模式获得的增益较小(功率几乎为零)，因此该光纤激光器可以稳定输出 TM_{01} 模式。

当仅改变光纤长度时，光纤激光器输出 TE_{01} 模式和 TM_{01} 模式的功率以及模式纯度(某一模式输出功率与所有模式输出功率总和的比值)与光纤长度的关系分别如图8(a)和图8(b)所示。

从图8(a)可以看出，光纤激光器输出 TE_{01} 模式和 TM_{01} 模式的功率随光纤长度的增加先快速增大

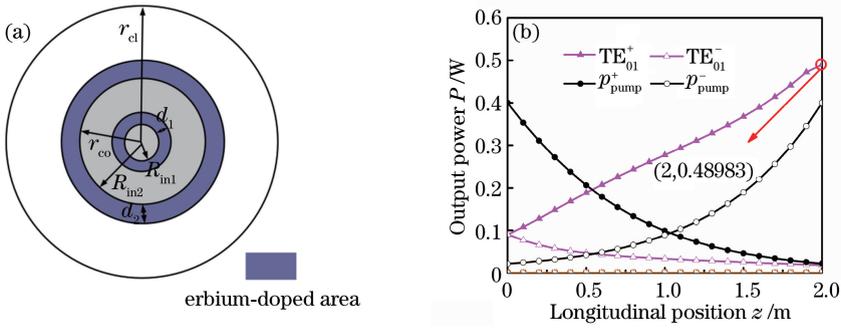


图 7 输出 TM_{01} 模式时的掺铒分布及各模式在谐振腔内的功率。

(a) 掺铒分布; (b) 抽运光和信号光在光纤激光器谐振腔内的功率

Fig. 7 Erbium dopant distribution and power of each mode in cavity for TM_{01} mode output.

(a) Erbium dopant distribution; (b) powers of pump and signal light in fiber laser cavity

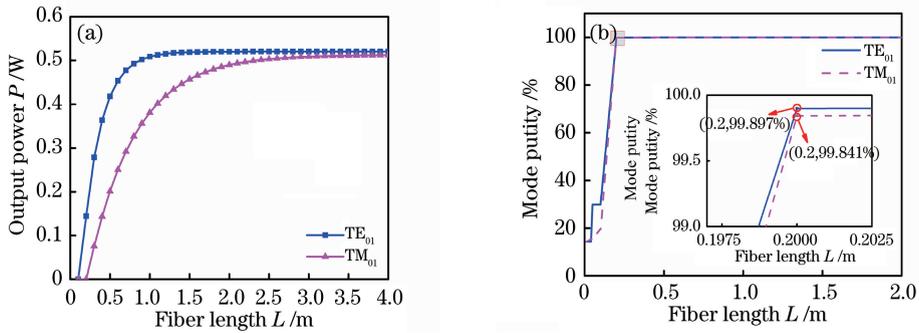


图 8 输出功率和模式纯度与光纤长度 L 的关系。(a) 输出功率与光纤长度 L 的关系; (b) 模式纯度与光纤长度 L 的关系

Fig. 8 Output power and mode purity as function of fiber length L . (a) Output power as function of fiber length L ; (b) mode purity as a function of fiber length L

后保持稳定,即随着光纤长度的增加,铒离子对抽运光的吸收越来越充分,当光纤增加到一定长度时,铒离子对抽运光的吸收达到饱和状态,继续增加光纤长度,铒离子对抽运光的吸收将不再增加。从图 8(a)还可以看出, TE_{01} 模式比 TM_{01} 模式先达到饱和状态。因此,可以根据吸收饱和状态选择最佳光纤长度。从图 8(b)可以看出,当光纤长度小于 0.2 m 时,随着光纤长度的增加,光纤激光器输出的 TE_{01} 模式和 TM_{01}

模式的模式纯度快速增大;当光纤长度大于 0.2 m 时, TE_{01} 模式和 TM_{01} 模式的模式纯度保持不变。因此,当掺铒光纤达到一定长度时, TE_{01} 模式和 TM_{01} 模式的模式纯度不受光纤长度的影响,通过设计掺杂分布可以实现某一模式的高纯度输出。

当仅改变光纤中的铒离子掺杂浓度时,光纤激光器输出 TE_{01} 模式和 TM_{01} 模式的功率和模式纯度与掺杂浓度的关系分别如图 9(a)和图 9(b)所示。

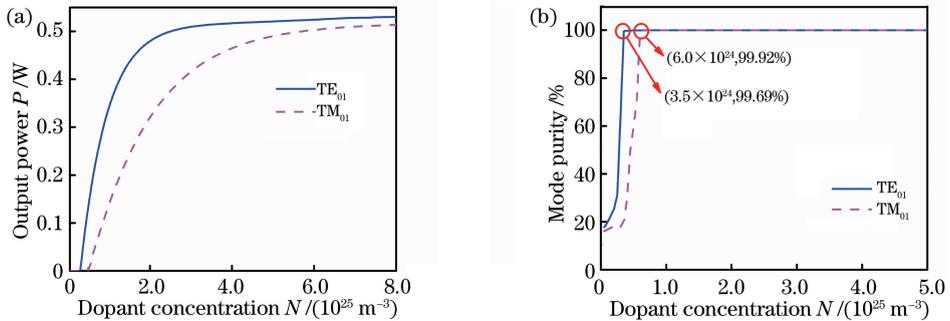


图 9 输出功率和模式纯度与掺杂浓度 N 的关系。(a) 输出功率与掺杂浓度 N 的关系; (b) 模式纯度与掺杂浓度 N 的关系

Fig. 9 Output power and mode purity as a function of dopant concentration N . (a) Output power as function of dopant concentration N ; (b) mode purity as a function of dopant concentration N

从图 9(a)可以看出,光纤激光器输出 TE_{01} 模式和 TM_{01} 模式的功率随铟离子掺杂浓度的增大呈现先快速增加后保持稳定的趋势。即随着铟离子掺杂浓度的增大,抽运光将逐渐被铟离子吸收,直至达到饱和状态。当铟离子掺杂浓度继续增大时,输出功率基本不变。由图 9(b)可知,当掺铟浓度小于 $6.0 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ ($3.5 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$)时,随着掺铟浓度增大,光纤激光器输出 TE_{01} 模式(TM_{01} 模式)的模式

纯度快速增加;当掺铟浓度大于 $6.0 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ ($3.5 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$)时, TE_{01} 模式(TM_{01} 模式)的模式纯度基本保持不变。因此,通过选择合适的铟离子掺杂浓度,可得到纯度较高的 TE_{01} 模式和 TM_{01} 模式。

当仅改变光纤激光器的抽运光功率时,光纤激光器输出 TE_{01} 模式和 TM_{01} 模式的功率和模式纯度与抽运光功率的关系分别如图 10(a)和图 10(b)所示。

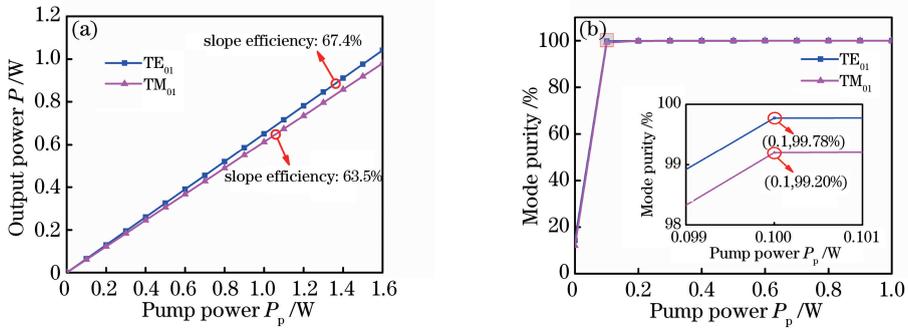


图 10 输出功率和模式纯度与抽运功率的关系。(a)输出功率与抽运功率的关系;(b)模式纯度与抽运功率的关系
Fig. 10 Output power and mode purity as a function of pump power. (a) Output power as a function of pump power; (b) mode purity as a function of pump power

从图 10(a)可以看出,当抽运光功率为 $0 \sim 1.6 \text{ W}$ 时,光纤激光器 TE_{01} 模式和 TM_{01} 模式的输出功率随着抽运功率的增大而逐渐增大,其斜率效率分别 67.4% 和 63.5% 。从图 10(b)可以看出,当抽运功率小于 0.1 W 时,随着抽运光功率的增大,光纤激光器输出 TE_{01} 模式和 TM_{01} 模式的模式纯度快速增加;当抽运光功率大于 0.1 W 时, TE_{01} 模式和 TM_{01} 模式的模式纯度基本保持不变。因此,激光器输出模式的模式纯度基本不受抽运光功率影响。

研究发现, TE_{01} 模式和 TM_{01} 模式的输出功率受光纤激光器的光纤长度、铟离子掺杂浓度以及抽运功率的影响。因此,通过选择最佳的光纤长度、铟离子掺杂浓度以及抽运功率,可实现最大功率的激光输出。光纤激光器输出 TE_{01} 模式和 TM_{01} 模式的模式纯度主要受铟离子掺杂浓度的影响,而基本不受光纤长度和抽运功率的影响。当掺杂浓度高于 10^{24} 量级时,光纤激光器的模式纯度高于 99.69% 。该光纤激光器在纳米粒子操作、模分复用等领域具有较高的应用价值。

研究发现,通过改变环形掺铟区域的厚度和掺铟起始半径,所提出的基于反抛物线型掺铟光纤的光纤激光器还可以单独输出 HE_{11} 、 HE_{21} 、 HE_{31} 、 EH_{11} 和 HE_{12} 模式,并且斜率效率均高于 60% ,输出模式纯度均高于 99% 。此外,所提出的反抛物线型光纤结构以及铟离子环形掺杂分布在工艺制作上均具有可行性。因此,上述仿真结果可以为反抛物线型掺铟光纤的制作提供参考^[19,21]。

参 考 文 献

4 结 论

提出一种环形掺铟分布的反抛物型光纤,将其应用于光纤激光器,可以得到单独的 TE_{01} 模式和 TM_{01} 模式输出。该光纤激光器可分别输出 TE_{01} 模式和 TM_{01} 模式,斜率效率分别达到 67.4% 和 63.5% ,输出的模式纯度分别为 99.97% 和 99.99% 。

[1] Sun B. High purity cylindrical vector beam all-fiber laser [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
孙彪. 高纯度轴对称偏振光束全光纤激光器[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.

[2] Li J L. Research on fiber laser source to generate single mode TM_{01} and TE_{01} [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
李觉灵. 单模输出 TM_{01} 和 TE_{01} 模式光纤激光器的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.

[3] Li Y M, Gong L, Li D, *et al.* Progress in optical tweezers technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(1): 0101001.
李银妹, 龚雷, 李迪, 等. 光镊技术的研究现状[J].

- 中国激光, 2015, 42(1): 0101001.
- [4] Zhou Z H, Zhang Y L, Zhu L Q. Trapping and manipulation of microparticles using radially polarized beams[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(7): 1016-1022.
周哲海, 张玉灵, 祝连庆. 基于径向偏振光束的微粒捕获与操控[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(7): 1016-1022.
- [5] Fatemi F K, Bashkansky M, Oh E, *et al.* Efficient excitation of the TE₀₁ hollow metal waveguide mode for atom guiding[J]. Optics Express, 2010, 18(1): 323-332.
- [6] Yu A P. Study on super-oscillation focusing device for radially polarized light [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
余安平. 径向偏振光超振荡聚焦器件研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [7] Meng J X. Electron acceleration by an circularly polarized electromagnetic wave[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2016.
孟建勋. 圆极化电磁波加速带电粒子的机制研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2016.
- [8] Li J L, Ueda K I, Musha M, *et al.* Generation of radially polarized mode in Yb fiber laser by using a dual conical prism [J]. Optics Letters, 2006, 31(20): 2969-2971.
- [9] Thirugnanasambandam M P, Senatsky Y, Ueda K I. Generation of radially and azimuthally polarized beams in Yb: YAG laser with intra-cavity lens and birefringent crystal[J]. Optics Express, 2011, 19(3): 1905-1914.
- [10] Zou L, Yao Y, Li J L. High-power, efficient and azimuthally polarized ytterbium-doped fiber laser[J]. Optics Letters, 2015, 40(2): 229-232.
- [11] Lin D, Daniel J M O, Gecevičius M, *et al.* Cladding-pumped ytterbium-doped fiber laser with radially polarized output[J]. Optics Letters, 2014, 39(18): 5359.
- [12] Wei K Y, Zhang W D, Huang L G, *et al.* Generation of cylindrical vector beams and optical vortex by two acoustically induced fiber gratings with orthogonal vibration directions [J]. Optics Express, 2017, 25(3): 2733-2741.
- [13] Liu T, Chen S P, Hou J. Selective transverse mode operation of an all-fiber laser with a mode-selective fiber Bragg grating pair[J]. Optics Letters, 2016, 41(24): 5692-5695.
- [14] Zhou Y, Yan K, Chen R S, *et al.* Resonance efficiency enhancement for cylindrical vector fiber laser with optically induced long period grating[J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(16): 161104.
- [15] Zhao Y H, Wang T X, Mou C B, *et al.* All-fiber vortex laser generated with few-mode long-period gratings[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(8): 752-755.
- [16] Wang F, Shi F, Wang T, *et al.* Method of generating femtosecond cylindrical vector beams using broadband mode converter [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(9): 747-750.
- [17] Wan H D, Wang J, Zhang Z X, *et al.* Passively mode-locked ytterbium-doped fiber laser with cylindrical vector beam generation based on mode selective coupler [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(16): 3403-3407.
- [18] Wei J C. Theoretical research and design of vortex fiber[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
卫俊超. 涡旋光纤的理论研究与设计[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [19] Ung B, Vaity P, Wang L, *et al.* Few-mode fiber with inverse-parabolic graded-index profile for transmission of OAM-carrying modes [J]. Optics Express, 2014, 22(15): 18044-18055.
- [20] Liao S Y, Gong M L, Zhang H T. Selection of doping radius for part-doped fibers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(11): 2836-2841.
廖素英, 巩马理, 张海涛. 部分掺杂光纤掺杂半径的选择[J]. 中国激光, 2009, 36(11): 2836-2841.
- [21] Townsend J E, Poole S B, Payne D N. Solution-doping technique for fabrication of rare-earth-doped optical fibers[J]. Electronics Letters, 1987, 23(7): 329-331.
- [22] Gong M L, Yuan Y Y, Li C, *et al.* Numerical modeling of transverse mode competition in strongly pumped multimode fiber lasers and amplifiers [J]. Optics Express, 2007, 15(6): 3236-3246.