

掺铋光纤的宽带光放大特性研究

程明胜¹ 颜纷纷¹ 桑新柱¹ 王葵如¹ 苑金辉¹ 余重秀¹ 罗艳华² 彭纲定² 贾昌鑫¹

¹北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876

²澳大利亚新南威尔士大学电气工程与通信学院光子学与光通信实验室, 悉尼 2052

摘要 基于自主研制的掺铋光纤, 对其进行光谱特性的实验和理论研究。通过实验测得的吸收光谱发现了4个明显的吸收带, 其中心分别是494、816、946、1410 nm。运用 Giles 模型对此光纤进行了放大特性的研究, 分析了光纤长度、抽运功率和输入信号光功率等参数对信号的增益和噪声指数的影响。建立了稳态情况下三能级跃迁模型的速率方程和传输方程, 并利用 Runge-Kutta 算法进行了数值研究。结果表明掺铋光纤在波长为 830 nm、功率为 200 mW 的光波抽运时, 1384~1480 nm 波段的增益系数大于 1.5 dB/m, 噪声系数趋近 5 dB。

关键词 光纤光学; 光谱学; 掺铋光纤; Giles 模型; 吸收谱; 增益系数

中图分类号 TN 929.11

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0405004

Broadband Optical Amplification Properties of Bismuth-Doped Optical Fiber

Cheng Mingsheng¹ Yan Binbin¹ Sang Xinzhu¹ Wang Kuiru¹ Yuan Jinhui¹

Yu Chongxiu¹ Luo Yanhua² Peng Gangding² Jia Changxin¹

¹State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

²Laboratory of Photonics & Optical Communications, School of Electrical Engineering & Telecommunications, University of New South Wales, Sydney 2052, Australia

Abstract Spectral properties of bismuth-doped optical fiber developed independently are experimentally and theoretically studied. The four absorption peaks centered at 494, 816, 946 and 1410 nm are observed in the absorption spectrum of the fiber. Using the Giles model, the amplification characteristics of the fiber are studied, and the influences of fiber length, pump power and input signal power on the gain and noise figure are analyzed. In the steady state, the rate equations and propagation equations of three-level model are established and calculated by means of Runge-Kutta method. The results show that when the bismuth-doped optical fiber is pumped at 830 nm and 200 mW in power, gain coefficients between from 1384 nm to 1480 nm are large than 1.5 dB/m and the noise figures are nearly 5 dB.

Key words fiber optics; spectroscopy; bismuth-doped fiber; Giles model; absorption spectra; gain coefficient

OCIS codes 060.2310; 160.4760; 230.2285; 300.6330

1 引 言

光纤放大器是光纤通信系统中一个重要的光器件,它能够补偿光信号在光纤中的损耗从而实现远距离传输。现在全球对信息容量的需求每年以 30%~40% 的速度增加^[1],但是目前商用的掺铒光纤放大器(EDFA)仅能覆盖 1520~1620 nm(C 和 L 波段),很难满足未来通信技术发展的需要。无水光纤技术使得石英光纤在

收稿日期: 2014-10-08; 收到修改稿日期: 2014-12-01

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(61405014)

作者简介: 程明胜(1990—),男,硕士研究生,主要从事光纤放大器方面的研究。E-mail: cmse513@163.com

导师简介: 颜纷纷(1981—),女,博士,讲师,主要从事新型光电子器件、光纤通信、三维显示等方面的研究。

E-mail: yanbinbin@bupt.edu.cn(通信联系人)

O、S、C 和 L 波段(1200~1700 nm)宽光谱范围的损耗降低,而当今光纤通信有效利用的 C 和 L 波段只是一小部分,还有 O 波段(1260~1360 nm)、E 波段(1360~1460 nm)和 S 波段(1460~1530 nm)约 300 nm 带宽依然没有被充分利用。稀土掺杂的石英光纤在近红外光谱区域是非常有效的活性介质,已被研制出的有掺镨光纤放大器(PDFA)、掺铽光纤放大器(TDFA)和掺铒光纤放大器(EDFA),但是没有单独的光纤放大器能够覆盖全光通信窗口。

1999年, Murata 等^[2]首次发现掺铋硅酸盐玻璃在峰值波长 1150 nm 处有宽带荧光辐射,半峰全宽为 150 nm。随后,在 2001 年, Fujimoto 等^[3]又报道了铋掺杂铝硅酸盐玻璃在 500 nm 光波激发下产生 1000~1600 nm 的超宽带辐射,峰值 1140 nm 处的能级寿命为 630 μs,半峰全宽达到 220 nm。2003 年,他们又在掺铋石英玻璃中观察到了 1.3 μm 光信号的放大现象^[4]。随后在一系列掺铋玻璃中都观察到近红外宽带发光^[5-6]。2005 年, Dvoyrin 等^[7]首次利用改进型化学气相沉积(MCVD)技术制作出掺铋光纤,其发光谱半峰全宽为 200 nm,发射截面高达 $6 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ 。随后在掺铋硅酸盐光纤中观察到了 1300~1500 nm 范围内的光放大和激光现象^[8-9]。我国一些科研机构也对掺铋增益材料进行了系统研究^[10-14]。Ren 等^[15]在掺铋锆酸盐玻璃中研究了 1272~1348 nm 连续波长范围内的光放大现象。因此掺铋光纤在未来超宽带光放大器中有望扮演重要的角色。

尽管掺铋材料的近红外超宽带发光吸引了许多研究人员的注意,并且相应的材料和器件也得到了快速的发展,但是铋相关的近红外发光机理仍不明确。发光机理备受争议,基本上分为以下三类^[16]: 1) 高价态的 Bi, 如 Bi^{5+} 和相关的分子; 2) 低价态的铋, 如 BiO , Bi^+ , 团簇离子; 3) 点缺陷。本文基于自主研制的掺铋光纤及实验测得的光纤吸收谱,采用发光中心源于 Bi^+ 的观点,并根据实测的数据构建能带图,然后运用三能级跃迁模型求得稳态情况下的速率方程和功率传输方程。根据这个模型可以优化参数如光纤长度和抽运功率等以实现较好的增益和噪声指数。

2 实验及理论分析

2.1 实验

研究组制作了掺铋光纤,其 Bi, Er, Al, Ge 的原子数分数分别为 0.1%, 0.002%, 0.1%, 1.68%。光纤的数值孔径(NA)是 0.235,芯直径为 3.0 μm。利用截断法测量光纤的吸收谱,结果如图 1 所示。根据铟和铋活性中心的吸收谱可以判定图 1 中高的吸收峰是由铋离子造成的,如 A、B、C 带。近红外波段吸收的 D 带是铋离子和氢氧根离子共同的吸收,中心波长处于 700 nm 左右的 E 带亦是由铋离子产生^[17]。图中以 550 nm 和 1540 nm 为中心的吸收带分别对应铟离子的原子态 $^4\text{S}_{3/2}$ 和 $^4\text{I}_{13/2}$ 。

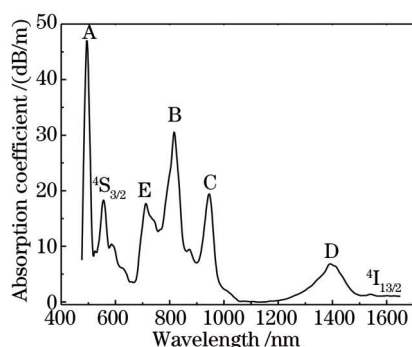


图1 掺铋光纤的吸收谱

Fig.1 Absorption spectrum of bismuth-doped optical fiber

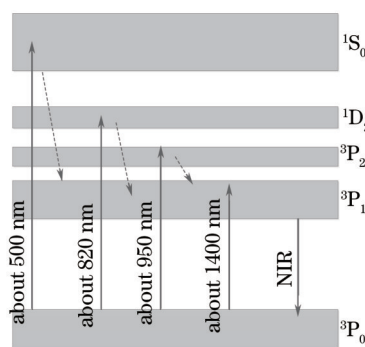


图2 Bi^+ 能带示意图

Fig.2 Energy band schematic diagram of Bi^+

根据吸收谱和能量匹配条件,关于铋离子近红外(NIR)宽带发光机理选择采用 Bi^+ 发光的观点^[16]。 Bi^+ 最外层电子组态为 $6s^2 6p^2$, 根据自旋角动量与轨道角动量耦合理论,其能级分裂为基态的 $^3\text{P}_0$, 和激发态 $^1\text{S}_0$, $^1\text{D}_2$, $^3\text{P}_{2,1}$, 其中的激发态分别对应图 1 中的 A、B、C 和 D 带,能带示意图如图 2 所示。该掺杂光纤在 500、820、950、1400 nm 的抽运光激发下可以观察到近红外宽带辐射。辐射峰会随着掺杂组分的变化而发生频移,也会随着抽运光波长的变化而不同。抽运光把基态 $^3\text{P}_0$ 的粒子抽运到激发态后,绝大部分粒子以无辐射跃迁到亚稳态 $^3\text{P}_1$, $^3\text{P}_1$ 的粒子辐射跃迁到 $^3\text{P}_0$, 伴随着近红外宽带光辐射。

2.2 理论模型

为了在实验设计中能够对系统参数进行优化,比如光纤长度、浓度以及抽运功率等,理论模型的建立十分重要。铋离子的能级比较复杂,简化情况下,根据其光谱特性可归纳为三能级系统。如果要对掺铋光纤放大器进行定量深入分析,就需要借助粒子数密度方程和光功率传播方程。

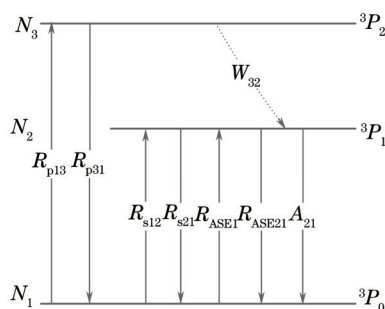


图3 三能级系统跃迁示意图

Fig.3 Transition diagram of three-level system

稳态情况下的速率方程如(1)~(4)式所示。

$$dN_1/dt = -(R_{p13} + R_{s12} + R_{ASE12})N_1 + (R_{s21} + R_{ASE21} + A_{21})N_2 + R_{31}N_3, \quad (1)$$

$$dN_2/dt = (R_{s12} + R_{ASE12})N_1 - (R_{s21} + R_{ASE21} + A_{21})N_2 + W_{32}N_3, \quad (2)$$

$$dN_3/dt = R_{p13}N_1 - (W_{32} + R_{31})N_3, \quad (3)$$

$$N = N_1 + N_2 + N_3, \quad (4)$$

式中 N_1 、 N_2 和 N_3 分别是基态、亚稳态和激发态的粒子数密度, N 是总的粒子数密度。 A_{21} 是自发辐射跃迁几率, W_{32} 是从激发态到亚稳态的无辐射跃迁几率。因为 A_{21} 和 W_{32} 占比很大,所以忽略了从亚稳态到基态的无辐射跃迁。 R 表示抽运光、信号光和自发辐射的受激吸收系数或受激辐射系数,分别表示为

$$R_{s21} = \left(\frac{P_s}{A} \right) \sigma_s^c / h\nu_s, \quad (5)$$

$$R_{s12} = \left(\frac{P_s}{A} \right) \sigma_s^a / h\nu_s, \quad (6)$$

$$R_{p31} = \left(\frac{P_p^+ + P_p^-}{A} \right) \sigma_p^c / h\nu_p, \quad (7)$$

$$R_{p13} = \left(\frac{P_p^+ + P_p^-}{A} \right) \sigma_p^a / h\nu_p, \quad (8)$$

$$R_{ASE21} = \left(\frac{P_{ASE}^+ + P_{ASE}^-}{A} \right) \sigma_s^c / h\nu_s, \quad (9)$$

$$R_{ASE12} = \left(\frac{P_{ASE}^+ + P_{ASE}^-}{A} \right) \sigma_s^a / h\nu_s, \quad (10)$$

式中 P_s 是信号光的功率, P_p 和 P_{ASE} 分别表示抽运光和放大的自发辐射(ASE)光功率,符号“+、-”分别表示光的传播方向前向和后向。 σ_p^a 和 σ_p^c 分别表示抽运光的吸收截面和辐射截面, σ_s^a 和 σ_s^c 分别表示信号光的吸收截面和辐射截面,截面的物理含义是指粒子吸收光或发射光的能力, h 为普朗克常数, ν_p 和 ν_s 分别表示抽运光的吸收频率和辐射频率。

因为激发态的寿命非常短,远小于亚稳态的寿命,所以可以类比掺铒光纤放大器的二能级近似模型,将此掺铋光纤放大器的三能级简化成二能级。 N_3 近似为 0, $N = N_1 + N_2$ 。抽运光、信号光和 ASE 的功率沿着光纤芯的传播方程可表示为

$$dP_p^a/dz = (\pm \sigma_p^c N_2 \mp \sigma_p^a N_1) \Gamma_p P_p \mp \alpha_p P_p, \quad (11)$$

$$dP_s/dz = (\sigma_s^c N_2 - \sigma_s^a N_1) \Gamma_s P_s - \alpha_s P_s, \quad (12)$$

$$dP_{ASE}^{\pm}(\nu)/dz = (\pm\sigma_{\nu}^c N_2 \mp \sigma_{\nu}^a N_1)\Gamma_{\nu} P_{ASE}^{\pm} \pm \sigma_{\nu}^c N_2 \Gamma_s m h\nu \Delta\nu \mp \alpha_{\nu} P_{ASE}^{\pm}, \quad (13)$$

式中 Γ_s 和 Γ_p 分别是信号光和抽运光模场与纤芯内掺杂离子的重叠因子, m 是模式数, 考虑两个偏振态 m 取值为 2, $\Delta\nu$ 是每一束自发辐射光的带宽。为了求解(11)~(13)式需要知道吸收截面、辐射截面和重叠因子的数值, 但这些值的测量很难准确测得, Giles 模型^[18]对以上进行了简化, 转化成实验上容易测得的 4 个参数: 吸收系数、增益系数、饱和参数和背景损耗系数。方程如下:

$$\frac{dP_k}{dz} = u_k(\alpha_k + g_k)\frac{N_2}{N}P_k + u_k g_k \frac{N_2}{N} m h\nu_k \Delta\nu_k - u_k(\alpha_k + l_k)P_k, \quad (14)$$

$$\frac{N_2}{N} = \sum_k \frac{P_k(z)\alpha_k}{h\nu_k \zeta} \left/ \left[1 + \sum_k \frac{P_k(z)(\alpha_k + g_k)}{h\nu_k \zeta} \right] \right., \quad (15)$$

$$\alpha_k = \sigma_{ak} \Gamma_k N, \quad (16)$$

$$g_k = \sigma_{ck} \Gamma_k N, \quad (17)$$

$$\zeta = \pi A N / \tau, \quad (18)$$

$$G = \frac{P_s^{\text{out}}}{P_s^{\text{in}}}, \quad (19)$$

$$F_N = 10 \lg \left(\frac{P_{ASE}}{h\nu G \Delta\nu} + \frac{1}{G} \right). \quad (20)$$

式中 α_k 是吸收系数, g_k 是辐射系数, ζ 是饱和参数, A 是掺杂离子的有效面积, k 表示在光纤中传播的光波数, Giles 模型是把纤芯中的光分成 k 束并用 $\Delta\nu_k$ 表示每一束的带宽, 对于本次模拟噪声的带宽设置为 2 nm。 G 表示信号光的放大倍数, F_N 是系统的噪声指数, 描述信号光通过光纤放大器后信噪比的变化。

3 结果及分析

3.1 吸收谱和辐射谱

ASE 在光纤中的传播有两个方向, 前向和后向, 在前向抽运时如果考虑两个方向 ASE 的传播, (14) 式就可以变成 4 个非线性常微分方程。运用 Runge-Kutta 算法和打靶法可对方程组求出数值解。用于计算的参数见表 1。

表 1 用于数值计算的参数

Table 1 Parameters used for numerical calculation

Parameter	Symbol	Value
Lifetime of metastable state / μs	τ_{Bi}	725
Dopant ion radius / μm	r	1.5
Confinement factor of pump light	Γ_p	0.856
Confinement factor of signal light	Γ_s	0.514
Bismuth density / m^{-3}	N_{Bi}	2.84×10^{25}
Background loss /(dB/m)	l	0.03
ASE effective bandwidth /nm	$\Delta\nu$	2

图 4 中黑实线是实验测得的吸收谱, 峰值吸收波长在 1375 nm, 1375 nm 的吸收峰是氢氧根离子振动和铋活性中心共同作用产生的。红虚线是 830 nm 抽运下掺杂光纤的辐射谱, 其中心波长在 1420 nm。由于铷离子的作用, 在 1540 nm 处出现了一个辐射峰值。根据掺铋模型和实验测的吸收谱和辐射谱可以模拟光信号功率在光纤中的变化情况。图 5 是 0.5 m 长的掺铋光纤在 830 nm 抽运光的激发下不同抽运功率的增益系数谱。抽运功率为 200 mW 时, 1384~1480 nm 波段的增益系数大于 1.5 dB/m。在抽运功率增大时, 增益系数变化幅度较大的是以 1420 nm 为中心的波段。

3.2 增益及噪声特性

模拟使用的光纤长度为 6 m, 信号光的输入功率为 -30 dBm, 图 6 描绘了抽运光功率和信号光增益之间的关系, 初始阶段随着抽运功率的增加信号的增益也随之增加, 但达到一定值后增益趋于饱和而不再增

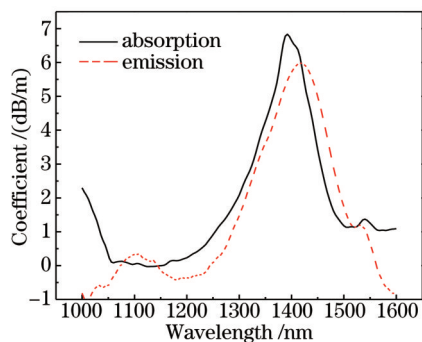


图4 测量的掺铋光纤的吸收系数和辐射系数
Fig.4 Measured absorption coefficient and emission coefficient of bismuth-doped optical fiber

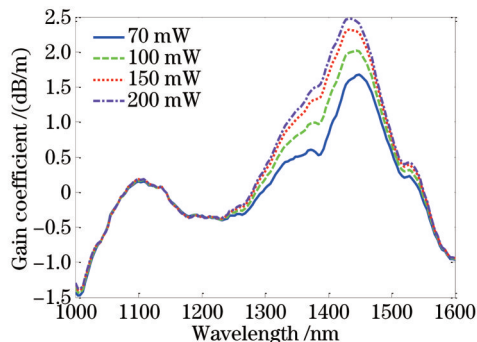


图5 模拟的830 nm波长抽运下掺铋光纤的增益系数
Fig.5 Simulated gain coefficient of bismuth-doped fiber pumping in 830 nm

加。4个信号波长中,1480 nm波长的信号光首先趋于饱和,其饱和和抽运功率为300 mW。在50 mW抽运时,1400 nm波长的增益最小为-30 dB,表明该波段的受激吸收最为强烈。图7描述了4个不同信道的噪声指数随抽运功率的变化关系,噪声指数是表征放大器的一个重要参数,通常增益越大噪声指数越小,因为增益大意味着信号光消耗了大部分的激发态粒子数,而与信号光产生增益竞争的ASE因此会被抑制。从图7中观察到1480 nm波长的信号噪声指数特性非常好,随着抽运功率变化,噪声指数的波动非常小。

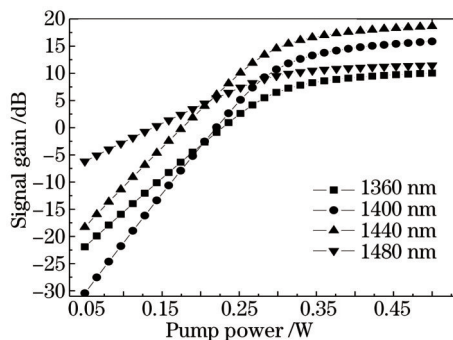


图6 信号光增益随抽运功率的变化
Fig.6 Signal gain versus pump power

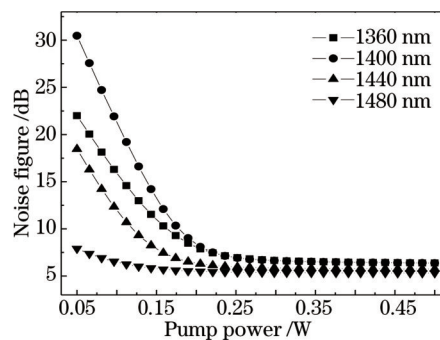


图7 噪声指数随抽运功率的变化
Fig.7 Noise figure versus pump power

图8、9描述的是6 m长的掺铋光纤在波长为830 nm、功率为500 mW时的光波抽运下,信号增益、噪声指数与输入信号功率的变化关系。掺铋光纤在抽运光的激发下,大部分的基态粒子被抽运到激发态,信号光沿着光纤被逐渐放大,同时也消耗激发态的粒子数,并且越接近光纤末端激发态粒子数消耗程度越大。图8中4种信号光增益的变化趋势相似,随着信号光的输入功率增加,信号的增益逐渐下降,原因是对于大信号维持相同的增益所需要的激发态粒子数更多。图9小信号区域中,信号光输入功率增大,噪声指数基本不变。大信号区域中,信号光输入功率越大,噪声指数也越大,这种变化趋势源于信号光增益的下降(如图8所示)。

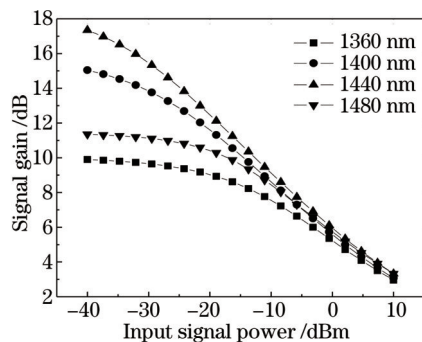


图8 信号光增益随输入信号功率的变化
Fig.8 Signal gain versus input signal power

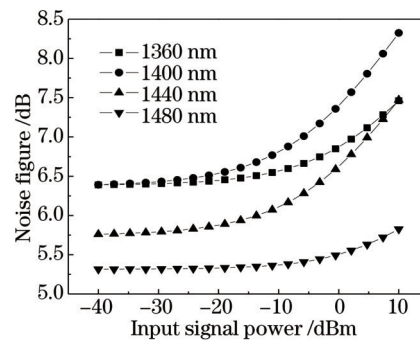


图9 噪声指数随输入信号功率的变化
Fig.9 Noise figure versus input signal power

3.3 增益和上能态粒子数所占比

当光纤组分、抽运功率固定时,对于不同波长的信号光,其达到最大增益的最佳长度不同。图 10 中,信号光的输入功率为 -30 dBm, 500 mW、 830 nm 光波抽运掺铋光纤,随着光纤长度的增加信号增益逐渐变大,在 9 m 左右达到最大值,然后下降。下降的原因有:1) 抽运光不能充分抽运光纤末端的基态粒子,使得信号光由于受激吸收而功率减弱;2) 在光纤 9 m 处信号光由于放大变成了大信号,其消耗的亚稳态粒子数是可观的,导致基态粒子数增多,所以信号光的基态吸收增强。图 11 为 1440 nm 光波在不同抽运功率下,信号增益沿光纤长度的变化情况。在此图 11 中,当给定抽运功率时,存在一个最佳光纤长度,在最佳长度处信号光的增益最大,所以当抽运功率固定时利用计算机仿真可以有效地估测光纤的最佳长度。

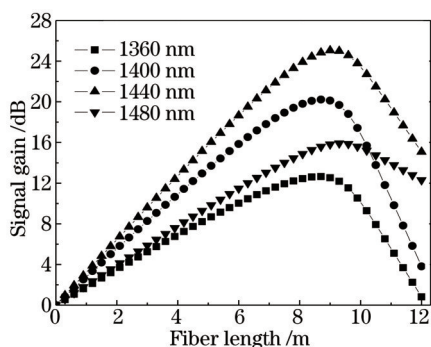


图 10 信号增益沿光纤长度的变化

Fig.10 Variation of signal gain with the fiber length

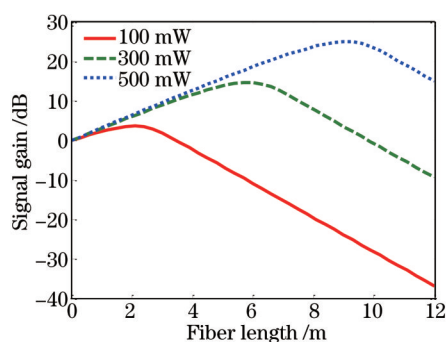


图 11 不同抽运功率时信号增益沿光纤长度的变化

Fig.11 Variation of signal gain with the fiber length under different pump powers

光纤放大器对光信号放大的最根本机理是粒子数反转,即亚稳态的粒子数大于基态的粒子数,所以研究亚稳态的粒子数对于深入研究掺铋光纤的放大特性很有帮助,同时模拟的结果也会帮助验证和修正已建立的模型。图 12 中,信号光的波长是 1440 nm,图 12 展示了 3 个不同抽运功率下,上能态粒子数所占比沿着光纤长度的变化情况。抽运功率越大处于粒子数反转的光纤长度越长,也越有助于放大光信号, 500 mW 抽运时上能态粒子数所占比为 0.5 时的光纤长度约为 9 m,这和图 11 中的最佳光纤长度相吻合,表示建立的模型具有自洽性。图 13 中的信号光波长为 1440 nm,抽运功率为 500 mW,当增大输入信号光功率时,上能态粒子数所占比沿光纤长度的变化情况如图 13 所示。输入信号光的功率增大时,光纤末端的上能态粒子数所占比会增加,当信号光的输入功率为 0 dBm 时,曲线尾端出现明显的上升现象,原因是光纤末端信号光比较强,基态粒子吸收信号光跃迁到上能态的数目增加导致上能态粒子数的下降趋势减缓。

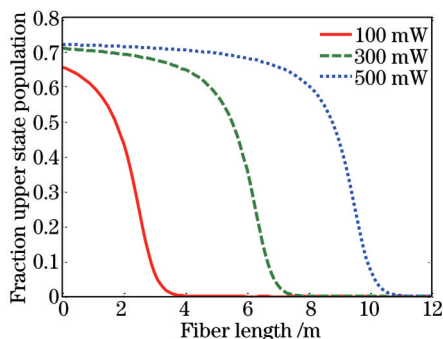


图 12 不同抽运功率时上能级粒子数所占比沿光纤长度的变化

Fig.12 Variation of fraction of upper state population with the fiber length under different pump powers

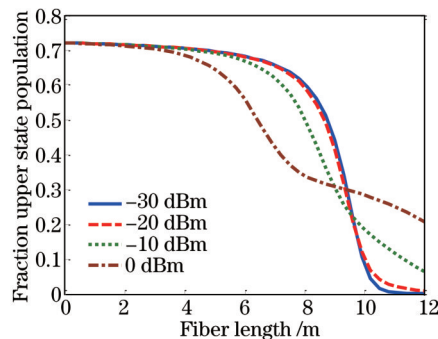


图 13 不同信号输入功率时上能级粒子数所占比沿光纤长度的变化

Fig.13 Variation of fraction of upper state population with the fiber length under different signal powers

4 结 论

通过对掺铋光纤的吸收谱测量和铋离子发光机理的研究,根据实验测量的数据构建了能带图。根据能

量匹配条件基于 Bi³⁺ 发光机制,对掺铋光纤进行了模型构建并进行数值研究。分析了抽运光功率、信号光输入功率对增益和噪声指数的作用,研究了上能态粒子数所占比例和信号光增益沿光纤长度的变化情况。模拟结果表明当抽运功率为 200 mW,输入信号光功率为 1 mW 时,1384~1480 nm 波段的增益系数大于 1.5 dB/m,噪声系数趋近 5 dB。

参 考 文 献

- 1 Toshio Morioka. New generation optical infrastructure technologies: "EXAT initiative" towards 2020 and beyond[C]. 14th Opto Electronics and Communications Conference, 2009: FT4.
- 2 K Murata, Y Fujimoto, T Kanabe, *et al.*. Bi-doped SiO₂ as a new laser material for an intense laser[J]. Fusion Engineering and Design, 1999, 44(1): 437-439.
- 3 Y Fujimoto, M Nakatsuka. Infrared luminescence from bismuth-doped silica glass[J]. Jpn J Appl Phys, 2001, 40: L279-L281.
- 4 Y Fujimoto, M Nakatsuka. Optical amplification in bismuth-doped silica glass[J]. Appl Phys Lett, 2003, 82(19): 3325-3326.
- 5 Peng Mingying, Qiu Jianrong, Chen Danping, *et al.*. Bismuth- and aluminum- codoped germanium oxide glasses for super-broadband optical amplification[J]. Opt Lett, 2004, 29(17): 1998-2000.
- 6 Meng Xiangeng, Qiu Jianrong, Peng Mingying, *et al.*. Infrared broadband emission of bismuth-doped barium-aluminum-borate glasses[J]. Optics Express, 2005, 13(5): 1635-1642.
- 7 V V Dvoyrin, V M Mashinsky, E M Dianov, *et al.*. Absorption, fluorescence and optical amplification in MCVD bismuth-doped silica glass optical fibres[C]. European Conference on Optical Communications, 2005, 4: 949-950.
- 8 E M Dianov, S V Firstov, V F Khopin, *et al.*. Bi-doped fibre lasers and amplifiers emitting in a spectral region of 1.3 μm[J]. Quantum Electron, 2008, 38(7): 615-617.
- 9 I A Bufetov, S V Firstov, V F Khopin, *et al.*. Bi-doped fiber lasers and amplifiers for a spectral region of 1300~1470 nm[J]. Opt Lett, 2008, 33(19): 2227-2229.
- 10 Peng Mingying, Wang Chen, Qiu Jianrong, *et al.*. Novel bismuth-doped luminescent materials for super-broadband fiber amplifiers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005, 42(12): 41-45.
彭明莹,汪 晨,邱建荣,等.超宽带光纤放大器用的新型掺铋发光材料[J].激光与光电子学进展,2005,42(12): 41-45.
- 11 Zhou Shifeng, Ruan Jian, Qiu Jianrong. Infrared luminescence mechanism of bismuth-doped glasses and broadband optical amplification[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(2): 36.
周时凤,阮 健,邱建荣.铋掺杂玻璃的红外发光机理和宽带光放大[J].激光与光电子学进展,2009,46(2): 36.
- 12 Zhou Shifeng, Qiu Jianrong. Novel bismuth-doped glasses with super-broadband optical amplification[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(2): 29.
周时凤,邱建荣.新型铋掺杂玻璃的超宽带光放大[J].激光与光电子学进展,2008,45(2): 29.
- 13 Wu Jindong, Chen Danping, Lu Weimin, *et al.*. Fabrication of Bi-doped silica fibers with near infrared broadband emission[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 046003.
吴金东,陈丹平,卢卫民,等.近红外宽带发光掺铋石英光纤的研制[J].光学学报,2011,31(4): 046003.
- 14 Gao Yanyang, Jin Lu, Tang Guoyu, *et al.*. Spectral properties of Er³⁺-Bi³⁺ co-doped borate glasses[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1215002.
高艳阳,金 露,汤国玉,等.铒铋共掺硼酸盐玻璃的光谱特性[J].中国激光,2013,40(12): 1215002.
- 15 J Ren, B Wu, X Jiang, *et al.*. Broadband optical amplification near 1300 nm in bismuth-doped germanate glass[J]. Appl Phys B, 2007, 88: 363-366.
- 16 Peng Mingying, Dong Guoping, Lothar Wondraczek, *et al.*. Discussion on the origin of NIR emission from Bi-doped materials[J]. J Non Cryst Solids, 2011, 357(11-13): 2241-2245.
- 17 T M Hau, X Yu, D Zhou, *et al.*. Super broadband near-infrared emission and energy transfer in Bi-Er co-doped lanthanum aluminosilicate glasses[J]. Optical Materials, 2013, 35(3): 487-490.
- 18 C Randy Giles. Modeling erbium-doped fiber amplifiers[J]. J Lightwave Technol, 1991, 9(2): 271-283.

栏目编辑:王晓琰