

基于铒镱共掺纳米晶的聚合物光波导放大器的增益特性

尹 姣 曲春阳 张美玲 王希斌 衣云骥 陈长鸣 孙小强 王 菲* 张大明

吉林大学电子科学与工程学院, 集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区,
吉林省光通信用聚合物波导器件工程实验室, 吉林 长春 130012

摘要 通过理论模拟和计算对基于氟钇钠(NaYF₄):镱(Yb³⁺), 铒(Er³⁺)纳米晶的聚合物光波导放大器在 1.55 μm 处的增益特性进行了研究。分析中采用的波导芯层为 NaYF₄: 18% Yb³⁺, 10% Er³⁺ 纳米晶掺杂的 SU-8 2005 聚合物, 包层为 P(MMA-GMA) 聚合物。通过测试和分析纳米晶材料的吸收光谱和荧光光谱, 利用 Judd-Ofelt 理论计算出了相应的 Judd-Ofelt 参数: $\Omega_2=6.302 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\Omega_4=0.69 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\Omega_6=7.572 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。通过求解原子速率方程与光功率传输方程模拟分析了波导放大器在 1.55 μm 波长的增益特性, 得到的增益曲线具有饱和效应, 当 Er³⁺ 离子浓度为 $7.5 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ 时获得的最大增益为 9.7 dB。以 SiO₂ 作为下包层, NaYF₄: Yb³⁺, Er³⁺ 纳米晶掺杂的 SU-8 2005 聚合物作为芯层, P(MMA-GMA) 聚合物作为上包层, 制备了聚合物光波导放大器, 当波长为 980 nm 的抽运光功率为 170 mW、信号光功率为 0.1 mW 时, 器件获得的最大相对增益为 3.42 dB/cm。

关键词 集成光学器件; 光波导放大器; 聚合物; NaYF₄: Yb³⁺, Er³⁺ 纳米晶; 相对增益

中图分类号 TN256 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1213001

Gain Characteristics of Polymer Waveguide Amplifiers Based on Er³⁺, Yb³⁺ Co-Doped Nanocrystals

Yin Jiao Qu Chunyang Zhang Meiling Wang Xibin Yi Yunji Chen Changming
Sun Xiaoqiang Wang Fei Zhang Daming

State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Engineering Laboratory on Polymeric Waveguide Components of Optics Communications of Jilin Province, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China

Abstract Gain characteristics of waveguide amplifiers based on SU-8 2005 doped with NaYF₄: 18% Yb³⁺, 10% Er³⁺ nanocrystals (NCs) at 1.55 μm wavelength are investigated through numerical simulations. NaYF₄: 18% Yb³⁺, 10% Er³⁺ NCs are doped into SU-8 2005 polymer matrix as the core of the polymer waveguide, and the P(MMA-GMA) polymer is used as the top cladding. The absorption spectrum and photoluminescence spectrum of the NCs are measured and analyzed. The Judd-Ofelt parameters are achieved by means of Judd-Ofelt theory: $\Omega_2 = 6.302 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\Omega_4 = 0.69 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\Omega_6 = 7.572 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$. The gain characteristics of the waveguide amplifier at 1.55 μm wavelength are simulated by combining the power propagation equations as well as the atomic rate equations. The gain curves have the saturation effects. The maximum gain of 9.7 dB with the Er³⁺ concentration of $7.5 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ is obtained. The top cladding of the waveguide amplifier with SU-8 doped with NaYF₄: Yb³⁺, Er³⁺ nanocrystals is P(MMA-GMA), and bottom cladding is SiO₂, respectively. For input signal power of 0.1 mW and 980 nm pump power of 170 mW, a relative optical gain of 3.42 dB/cm at 1550 nm is obtained.

Key words integrated optical devices; optical waveguide amplifier; polymer; NaYF₄: Yb³⁺, Er³⁺ nanocrystals;

收稿日期: 2015-06-19; 收到修改稿日期: 2015-08-12

基金项目: 国家自然科学基金(61475061, 61405070, 61177027, 61261130586)、吉林省科技发展计划(20140519006JH)、吉林省发改委高技术产业专项资金(JF2012G048)

作者简介: 尹 姣(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事聚合物平面光波导放大器方面的研究。E-mail: 247975542@qq.com

导师简介: 张大明(1970—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事聚合物平面光子器件方面的研究。E-mail: zhangdm@jlu.edu.cn

*通信联系人。E-mail: wang_fei@jlu.edu.cn

relative gain

OCIS codes 130.3120; 130.5460; 250.4480; 160.5690

1 引 言

光放大器基于受激辐射的工作原理对光信号直接进行处理和放大,是光纤通信领域重要的研究成果,对全光网络的发展具有十分重要的促进意义^[1-3]。在众多光放大器中,掺铒(Er³⁺)光纤放大器(EDFA)目前最为成熟并实现了商用化,在长距离光通信系统中占有重要地位^[4-5]。但是EDFA中几十米到上百米的光纤长度非常不利于集成,使得其应用范围受到了一定的限制,在光纤接入网特别是在即将实现光纤到户的短距离通信系统中EDFA的应用存在较大困难。近年来,掺铒光波导放大器(EDWA)成为了光放大器领域里一个新的研究热点^[6-7]。与EDFA相比,EDWA的优势如下:器件结构小型化、成本低、易于集成等,对于短距离光通信系统的发展具有良好的推动作用^[8]。EDWA的基质材料主要分为无机材料和有机聚合物材料两大类,目前,一些光子公司已经推出了商品化的无机EDWA,但是其工艺流程复杂,生产周期长,成本高并且难于集成。而采用聚合物材料制备的EDWA相对于传统的无机EDWA来说,具有工艺相对简单且成熟,可以采用的聚合物种类繁多,易于集成等独特优势,在光纤通信领域具有良好的发展及应用前景^[9-11]。2004年11月,Wong等^[12]在制备铒、镱(Yb³⁺)共掺杂的聚合物光波导放大器的过程中应用紫外光直写技术,获得的单位相对增益为8.25 dB/cm。2009年,Bo等^[13]制备了一种新型的纳米颗粒——LaF₃:Er,Yb-LaF₃芯壳结构,制备出的EDWA获得的单位相对增益为2.06 dB/cm。2010年3月,Lei等^[14]将铒镱共掺氟钇钠(NaYF₄)纳米晶的表面用油酸包覆,并以这种纳米晶掺杂的KMBR聚合物作为芯层材料制备了波导放大器,在1535 nm处获得的单位相对增益为4.69 dB/cm。2014年,Liu等^[15]合成了NaYF₄:Yb³⁺,Er³⁺纳米晶,将其掺杂到SU-8 2005聚合物中作为有源层制备了EDWA,当信号光波长为1520 nm时获得了3.3 dB的相对增益。

从上述报道的实验结果中可以看出,目前关于铒镱共掺聚合物波导放大器的研究已取得了一些进展,在众多基质材料中,氟化物纳米晶的晶格可以有效避免高浓度掺杂的Er³⁺离子由于彼此靠近而产生的浓度猝灭效应,此外表面包覆亲油性修饰层的纳米晶在有机基质中的溶解性和分散性亦可得到有效的提高。NaYF₄具有低的声子能量,发光效率高,因此从NaYF₄:Yb³⁺,Er³⁺纳米晶的吸收光谱出发,分析讨论材料的各项参数对光波导放大器增益性能的影响将对实验工作具有重要的指导意义。采用NaYF₄:18%Yb³⁺,10%Er³⁺纳米晶,将其掺杂到SU-8 2005聚合物基质中作为波导的芯层材料,测试了纳米晶在980 nm抽运光激发下的吸收光谱,利用Judd-Ofelt理论,并通过求解原子速率方程与光功率传输方程首次对基于NaYF₄:18%Yb³⁺,10%Er³⁺纳米晶掺杂的聚合物EDWA在1.55 μm处的增益特性进行了详细的数值模拟,讨论并分析了Er³⁺离子在聚合物中的掺杂浓度、抽运光与信号光的重叠积分因子、Er³⁺的能级辐射寿命和信号光功率对增益的影响。以SiO₂作为下包层,NaYF₄:Yb³⁺,Er³⁺纳米晶掺杂的SU-8 2005聚合物作为芯层,P(MMA-GMA)聚合物作为上包层,采用传统的光刻显影等实验工艺制备了EDWA并测试了波导放大器的性能。

2 理论模型

图1为铒镱共掺杂系统的能级结构示意图,图中各个箭头分别代表相应能级之间的跃迁过程。铒镱共掺的光波导放大器是利用铒、镱离子的能级结构,通过受激吸收和受激发射等跃迁过程来实现对某特定波长的信号光的放大^[16]。当980 nm波长的抽运光作用于铒镱共掺系统,该系统的速率方程公式为^[17-18]

$$\frac{dN_1}{dt} = -(W_{12} + R_{13})N_1 + (A_{21} + A_{31} + A_{41} + W_{21})N_2 + R_{31}N_3 + C_{up}N_2^2 - K_{tr}N_1N_6, \quad (1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = W_{12}N_1 - (A_{21} + W_{21})N_2 + (A_{32} + A_{42})N_3 - 2C_{up}N_2^2, \quad (2)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = R_{13}N_1 - (R_{31} + A_{32} + A_{31})N_3 + A_{43}N_4 + K_{tr}N_1N_6, \quad (3)$$

$$\frac{dN_4}{dt} = C_{up}N_2^2 - (A_{43} + A_{42} + A_{41})N_4, \quad (4)$$

$$N_1 + N_2 + N_3 + N_4 = N_{Er}, \quad (5)$$

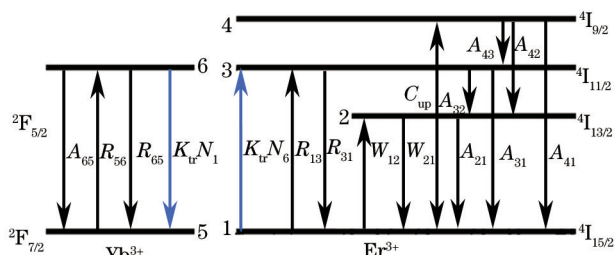


图1 钇镱共掺杂系统的能级结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of energy level for Er-Yb co-doped systems

$$\frac{dN_5}{dt} = -R_{56}N_5 + (A_{65} + R_{65})N_6 + K_{tr}N_1N_6, \quad (6)$$

$$\frac{dN_6}{dt} = R_{56}N_5 - (A_{65} + R_{65})N_6 - K_{tr}N_1N_6, \quad (7)$$

$$N_5 + N_6 = N_{Yb}, \quad (8)$$

式中 N_{Er} 和 N_{Yb} 分别是钇镱离子的掺杂浓度。 N_i 为能级 i 上钇或镱离子的粒子数浓度。 $A_{ij}=1/\tau_i$ 表示钇或镱从能级 i 到能级 j 的自发辐射几率, 其中 τ_i 是能级 i 上钇或镱离子的寿命; K_{tr} 是镱离子能级和钇离子能级的能量转移系数。钇离子对信号光的受激吸收几率用 W_{12} 表示, 钇离子对信号光的受激发射几率用 W_{21} 表示, R_{13} 表示钇离子对抽运光的受激吸收几率, R_{31} 表示钇离子对抽运光的受激发射几率, R_{56} 表示镱离子对抽运光的受激吸收几率, R_{65} 表示镱离子对抽运光的受激发射几率, 这些跃迁几率与光强度成正比。

$$W_{12} = \frac{\sigma_{12}(\nu_s)}{h\nu_s} I_s(x, y, z, t), \quad W_{21} = \frac{\sigma_{21}(\nu_s)}{h\nu_s} I_s(x, y, z, t), \quad (9)$$

$$R_{13} = \frac{\sigma_{13}(\nu_p)}{h\nu_p} I_p(x, y, z, t), \quad R_{31} = \frac{\sigma_{31}(\nu_p)}{h\nu_p} I_p(x, y, z, t), \quad (10)$$

$$R_{56} = \frac{\sigma_{56}^{Yb}(\nu_p)}{h\nu_p} I_p(x, y, z, t), \quad R_{65} = \frac{\sigma_{65}^{Yb}(\nu_p)}{h\nu_p} I_p(x, y, z, t), \quad (11)$$

式中 h 是普朗克常数。 $\sigma_{12}, \sigma_{21}, \sigma_{13}, \sigma_{31}, \sigma_{56}^{Yb}, \sigma_{65}^{Yb}$ 分别是钇镱离子对应能级的受激吸收与受激发射截面。

在稳定状态时, 信号光和抽运光的功率传输方程可以表示为

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = -\Gamma_p[\sigma_{13}N_1 + \sigma_{56}N_5 - \sigma_{65}N_6]P_p(z), \quad (12)$$

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = \Gamma_s[\sigma_{21}N_2 - \sigma_{12}N_1]P_s(z), \quad (13)$$

式中 Γ_s 和 Γ_p 为信号光、抽运光的模场与钇、镱离子掺杂分布函数之间的重叠积分因子。

在传输方向上任意一点 z 处的增益 $G^{[19]}$ 可表示为

$$G = 10 \lg \frac{P_s(z)}{P_s(0)}, \quad (14)$$

单位为 dB, 边界条件为

$$P_p(z=0) = P_0, \quad P_s(0) = P_s. \quad (15)$$

3 理论模拟和讨论

图2为测得的 $\text{NaYF}_4: 18\% \text{Yb}^{3+}, 10\% \text{Er}^{3+}$ 纳米晶的吸收光谱。从图中可以看出, Er^{3+} 离子相应的特征吸收峰清晰可见, 如 488、521、540、652、800、976、1530 nm 处的吸收峰, 它们分别对应于基态能级 $^4I_{15/2}$ 与激发态能级 $^4F_{7/2}, ^2H_{11/2}, ^4S_{3/2}, ^4F_{9/2}, ^4I_{9/2}, ^4I_{11/2}$ 和 $^4I_{13/2}$ 之间的跃迁过程。通过上述测得的 $\text{NaYF}_4: 18\% \text{Yb}^{3+}, 10\% \text{Er}^{3+}$ 纳米晶材料的吸收光谱, 利用 Judd-Ofelt 理论计算出了相应的 J-O 参数, 分别为: $\Omega_2=6.302 \times 10^{-20} \text{cm}^2$, $\Omega_4=0.69 \times 10^{-20} \text{cm}^2$, $\Omega_6=7.572 \times 10^{-20} \text{cm}^2$, 并基于 J-O 参数进一步计算出了自发辐射几率 A 、各个能级寿命 τ 以及各个能级的吸收发射截面 σ 等参数, 如表 1 所示。

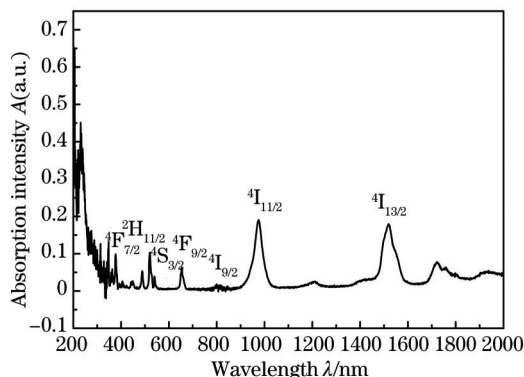


图2 NaYF₄:18%Yb³⁺,10%Er³⁺纳米晶的吸收光谱

Fig.2 Absorption spectra of NaYF₄:18%Yb³⁺,10%Er³⁺ nanocrystals

表1 NaYF₄:18%Yb³⁺,10%Er³⁺纳米晶掺杂的聚合物波导放大器的参数

Table 1 Parameters of polymer waveguide amplifier based on NaYF₄:18%Yb³⁺,10%Er³⁺ nanocrystals

Parameter	Value
Yb ³⁺ ion concentration, N_{Yb}	$N_{Yb}=1.8N_{Er}$
Er ³⁺ ⁴ I _{13/2} emission lifetime, τ_{21} /ms	2.02
Er ³⁺ ⁴ I _{11/2} emission lifetime, τ_{31} /ms	4.33
Er ³⁺ ⁴ I _{9/2} emission lifetime, τ_{41} /ms	0.86
Yb ³⁺ ² F _{7/2} emission lifetime, τ_{65} /ms	1.3
Er ³⁺ ⁴ I _{11/2} non-radiative lifetime, τ_{32} /ms	38.49
Er ³⁺ ⁴ I _{9/2} non-radiative lifetime, τ_{42} /ms	3.5
Er ³⁺ ⁴ I _{9/2} non-radiative lifetime, τ_{43} /ms	9.33
Er ³⁺ absorption cross-section(1550 nm), σ_{12} /m ²	8.95×10^{-25}
Er ³⁺ emission cross-section (1550 nm), σ_{21} /m ²	9.83×10^{-25}
Er ³⁺ absorption cross-section (980 nm), σ_{13} /m ²	2.32×10^{-25}
Yb ³⁺ absorption cross-section (980 nm), σ_{56} /m ²	1×10^{-24}
Yb ³⁺ emission cross-section (980 nm), σ_{65} /m ²	1×10^{-24}
Cross section of the active region, A / μ m ²	4×5
Upconversion coefficient, C_{up} /(m ² /s)	3.72×10^{-23}
Cross relaxed coefficient, K_c /(m ² /s)	2.4×10^{-22}

采用图3所示的截面为矩形的条形波导结构,以SiO₂作为下包层,NaYF₄:Yb³⁺,Er³⁺纳米晶掺杂的SU-8 2005 聚合物作为芯层,P(MMA-GMA)聚合物作为上包层。采用矩阵算法在设定的边界条件下求解原子速率方程,讨论在980 nm抽运光激发下的Er³⁺浓度、信号光和抽运光的重叠积分因子、Er³⁺亚稳态能级寿命和信号光功率对光波导放大器增益性能的影响。

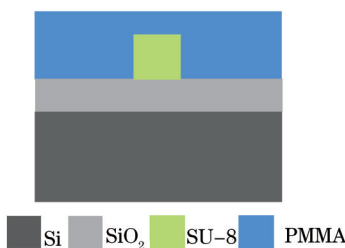


图3 矩形波导的截面示意图

Fig.3 Cross section of the rectangular waveguides

图4为在不同的铒离子掺杂浓度下放大器的增益随抽运光功率的变化情况。当Er³⁺离子浓度确定时,随着抽运光功率的增大,增益首先线性增大,而后趋于饱和;当抽运光功率为400 mW,Er³⁺离子浓度从 $4 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ 增加到 $1.3 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$ 时,增益从5.4 dB增大到16.0 dB。此外,随着Er³⁺离子掺杂浓度的增加,对应的饱和增益也会增大,但抽运功率的阈值也随之增加。但是在波导放大器的制备中,纳米晶在SU-8 2005 聚合物中的掺杂浓度

不能过大,否则会引起纳米晶在聚合物中的团聚,从而严重影响光波导放大器的性能,考虑到实验中 Er^{3+} 离子的浓度范围,在模拟计算中选择 Er^{3+} 离子浓度为 $7.5 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ 。

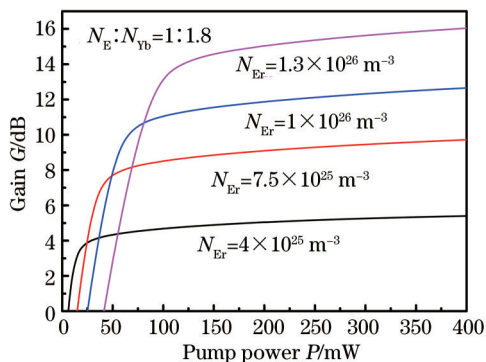


图4 不同铒离子浓度时增益随抽运光功率的变化曲线

Fig.4 Gain as a function of pump power for different Er^{3+} concentrations

在光波导放大器中,当只在波导芯中掺杂时,信号光、抽运光的模场与铒、镱离子掺杂分布函数之间的重叠积分因子 Γ ,定义为

$$\Gamma_{s,p} = \iint \psi_{s,p}(x,y)f(x,y)dxdy = \iint \psi_{s,p}(x,y)dxdy, \quad (16)$$

式中 $\psi_{s,p}(x,y)$ 是信号光和抽运光的归一化横向光强分布函数, $f(x,y)$ 是铒镱共掺系统的归一化横向掺杂分布函数,若假定芯层中铒、镱离子的掺杂是均匀的,则 $f(x,y)|_A = 1$ 。图5为模拟在不同重叠积分因子时放大器的增益随抽运光功率的变化情况。重叠积分因子 Γ 越大光波导放大器的增益越大,当抽运功率为400 mW时,随着重叠积分因子从0.5增加到0.9,器件饱和增益从5.2 dB增加到9.7 dB。在实验中,通过优化波导结构可以尽量提高重叠积分因子,因此选择 $\Gamma_s = \Gamma_p = 0.9$ 。

Er^{3+} 的亚稳态能级寿命对器件增益特性有着较大的影响。图6为 Er^{3+} 的 ${}^4\text{I}_{13/2}$ 能级辐射寿命不同时波导放大器的增益随抽运光功率的变化曲线。从图中可以看出:亚稳态能级 ${}^4\text{I}_{13/2}$ 的辐射寿命越长波导放大器的增益越大,当抽运光功率为400 mW,亚稳态能级 ${}^4\text{I}_{13/2}$ 的辐射寿命从2.02 ms减小到0.0202 ms时,增益从9.7 dB下降到-2.5 dB。总之,为获得同样大小的增益,亚稳态能级的寿命越小,所需抽运光功率就越大。这是为保证亚稳态能级与基态能级之间能够实现粒子数的反转,当亚稳态能级寿命越小时,只有抽运光功率相应地增加才能激发更多的 Er^{3+} 离子从基态能级受激吸收跃迁到激发态能级。

当波导长度一定时,波导放大器的增益会受到输入信号光功率的影响。图7为波导放大器在不同的输入信号光功率下增益随抽运光功率的变化曲线。波导放大器的增益随输入信号光功率的增加而减小,当信号光功率从0.01 mW增加到10 mW时,饱和增益从9.7 dB降低到6.9 dB,这一结果表明小信号能够比大信号获得更高的增益。

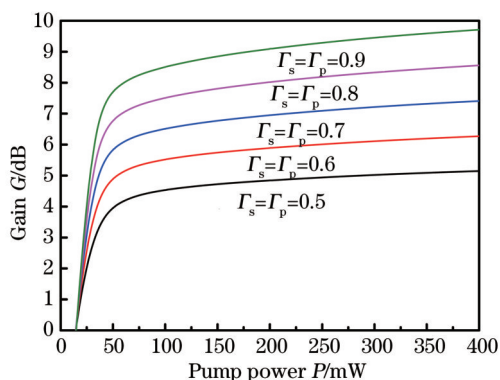


图5 不同重叠积分因子 Γ 时增益随抽运光功率的变化曲线

Fig.5 Gain as a function of pump power for different overlapping factors

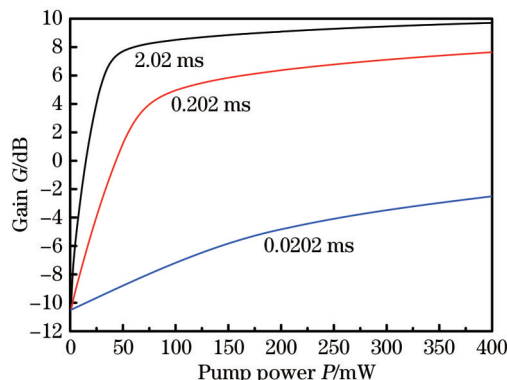


图6 不同能级辐射寿命时增益随抽运光功率的变化曲线

Fig.6 Gain as a function of pump power for different radiative lifetimes

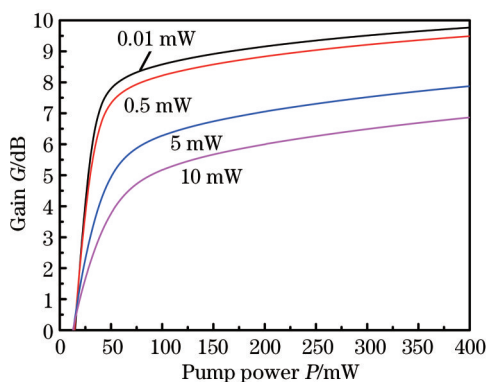


图7 不同信号光功率时增益随抽运光功率的变化曲线

Fig.7 Gain as a function of pump power for different signal powers

噪声系数是光放大器另一个重要的性能指标,在铒镱共掺波导放大器中,采用前端单向抽运方式,当抽运光功率越大、信号光功率越小、铒离子的掺杂浓度越小时,器件可获得较低的噪声系数^[17]。经过模拟计算,当 Er^{3+} 离子浓度为 $7.5 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$,信号光功率为0.01 mW,抽运光功率为400 mW时,波导放大器的噪声系数可控制在3 dB以下,此时波导放大器具有良好的增益及噪声特性。

4 聚合物光波导放大器的制备及性能测试

首先用注射器抽取2 mL的环己烷将0.5 mmol的 $\text{NaYF}_4:\text{Yb}^{3+},\text{Er}^{3+}$ 纳米晶完全溶解,并超声2 h得到透明均一的溶液。分别取出0.5 g的上述溶液以及2.0 g的SU-8 2005型紫外固化胶(即质量比为1:4)并将二者进行混合,在避光条件下继续超声1 h得到均匀掺杂的聚合物,作为光波导放大器的芯层材料。图8为制备矩形光波导放大器的工艺流程:1)分别用丙酮、乙醇将表面长有 SiO_2 的衬底表面清洗干净,之后用去离子水将表面残留的乙醇冲洗干净,吹干表面的水分;2)将超声完成的芯层聚合物旋涂在表面长有 SiO_2 层的Si衬底上(这里 SiO_2 作为波导下包层);3)通过光刻和显影两步工艺制备出矩形波导,并在150 °C固化30 min;4)旋涂一层厚度为4 μm 的P(MMA-GMA)聚合物作为上包层,并在120 °C固化2 h,完成器件的制备。图9分别为旋涂上包层前后的波导端面的扫描式电子显微镜(SEM)照片,可以看出制备的波导形貌良好,且波导截面尺寸为8 $\mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ 。

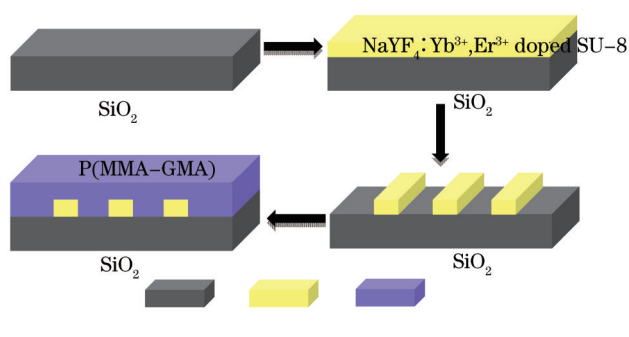


图8 矩形结构光波导放大器的制备流程图

Fig.8 Fabrication process of the waveguide amplifier with rectangular structure

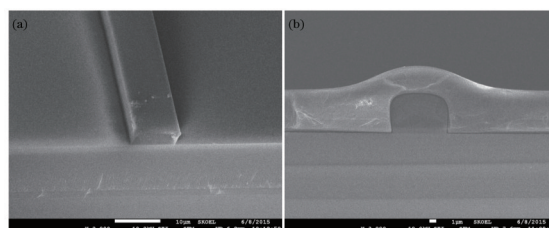


图9 (a) 未旋涂上包层的波导端面的SEM照片;(b) 旋涂上包层之后的波导端面的SEM照片

Fig.9 SEM microphotograph of cross section of the polymer waveguide (a) before and (b) after spin-coated cladding

对制备完成后的聚合物光波导放大器的端面进行解理,得到端面整齐的待测样品,在如图 10 所示的耦合测试系统中对其进行增益性能的测试。首先采用 1550 nm /980 nm 单模波分复用器(WDM)将可调谐激光器(Santec TSL-210)输出的信号光与抽运光耦合到聚合物 EDWA 中,在 EDWA 的输出端用光纤连接到光谱分析仪(OSA, ANDO AQ-6315A)中,测试信号光的输出光谱。光波导放大器的相对增益可表示为

$$G = 10 \lg\left(\frac{P_{s-out}^p}{P_{s-out}^p}\right) = 10 \lg(P_{s-out}^p) - 10 \lg(P_{s-out}^p), \quad (17)$$

式中 P_{s-out}^p 为系统中没有输入抽运光时信号光的输出功率; P_{s-out}^p 为在系统中输入一定功率的抽运光后信号光的输出功率^[20]。

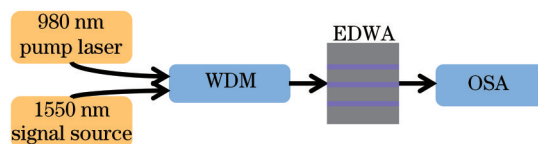


图 10 光波导放大器增益测试系统示意图

Fig.10 Schematic diagram of testing system of the polymer waveguide amplifier

图 11 为在 1550 nm 信号光功率分别为 0.1、0.5、1 mW 3 种情况下测得的聚合物光波导放大器的相对增益随着抽运光功率的变化曲线。如图 11 所示,1550 nm 信号光功率越小,聚合物 EDWA 的相对增益越大;当抽运光功率为 170 mW,信号光功率为 0.1 mW 时,信号光的最大增益为 3.42 dB/cm。

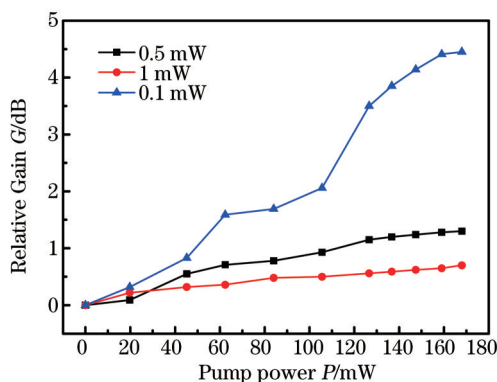


图 11 信号光功率分别为 0.1、0.5、1 mW 时器件相对增益随抽运光功率的变化曲线

Fig.11 Relative gain as a function of pump power for signal power of 0.1, 0.5, 1 mW

5 结 论

利用 Judd-Ofelt 理论并通过求解原子速率方程与光功率传输方程对基于 NaYF₄: 18%Yb³⁺, 10%Er³⁺ 纳米晶掺杂的聚合物波导放大器在波长 1.55 μm 处的增益特性进行了理论分析和计算。根据实验中的材料体系,分别讨论了 Er³⁺ 浓度、信号光和抽运光的重叠积分因子、Er³⁺ 亚稳态能级寿命以及信号光功率对增益特性的影响,并且优化了实验参数。模拟结果表明,当波导中 Er³⁺ 离子浓度为 7.5×10²⁵ m⁻³,信号光功率为 0.01 mW,抽运光功率 400 mW 时,获得的最大增益为 9.7 dB,上述结论对稀土掺杂的聚合物光波导放大器的结构设计和实验具有重要的指导意义。以 SiO₂ 作为下包层,NaYF₄: Yb³⁺, Er³⁺ 纳米晶掺杂的 SU-82005 聚合物作为芯层, P(MMA-GMA) 聚合物作为上包层制备了聚合物光波导放大器,当抽运光功率为 170 mW、信号光功率为 0.1 mW 时,器件获得了 3.42 dB/cm 的相对增益。

参 考 文 献

- 1 Ennen H, Schneider J, Pomrenke G, *et al.*. 1.54 μm luminescence of erbium-implanted III-V semiconductors and silicon[J]. Appl Phys Lett, 1983, 43(10): 943-946.
- 2 Yang Xianglin. Optical Amplifier and Its Application[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2000.
杨祥林. 光放大器及其应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2000.

- 3 Du Yang, Hu Guijun, Bai Song, *et al.*. High power all-optical gain-clamped and gain-flattened fiber amplifier[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1205003.
杜 洋, 胡贵军, 柏 松, 等. 全光增益控制的增益平坦型高功率光纤放大器[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1205003.
- 4 Zhou Kejiang, Pan Shuming, Ngo Nam Quoc, *et al.*. Gain equalization of EDFA using a loop filter with a single polarization controller[J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(7): 070604.
- 5 S Singh, R S Kaler. Flat gain L-band Raman-EDFA hybrid optical amplifier for dense wavelength division multiplexed system[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2013, 25(3): 250-252.
- 6 Zheng Libing, Wang Jianbin, Liang Xu, *et al.*. Study of polymer optical waveguide amplifier at 1.55 μm wavelength[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 105003.
郑礼炳, 汪建斌, 梁 旭, 等. 1.55 μm 波段聚合物光波导放大器的研究[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 105003.
- 7 Li Tong, Zhang Daming. Optical Design and Preparation of Er^{3+} - Yb^{3+} Co-Doped Polymeric Planar Optical Waveguide Amplifiers[D]. Changchun: Jilin University, 2009: 2-3.
李 彤, 张大明. 镱铒共掺聚合物平面光波导放大器的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009: 2-3.
- 8 Zhai Xuesong, Li Jie, Liu Shusen, *et al.*. Enhancement of 1.53 μm emission band in $\text{NaYF}_4:\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}, \text{Ce}^{3+}$ nanocrystals for polymer-based optical waveguide amplifiers[J]. Opt Mater Express, 2013, 3(2): 270-277.
- 9 Han Chao, Yue Yuanbin, Zhao Shimin, *et al.*. Design and fabrication of 650 nm arrayed waveguide grating[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0323002.
韩 超, 岳元斌, 赵世民, 等. 650 nm 阵列波导光栅波分复用器的设计与制备[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0323002.
- 10 Chen Cong, Zhang Dan, Li Tong, *et al.*. Demonstration of optical gain at 1550 nm in erbium-ytterbium co-doped polymer waveguide amplifier[J]. J Nanosci Nanotechnol, 2010, 10(3): 1947-1950.
- 11 Chen Xi, Wang Tianjiao, Liu Shusen, *et al.*. Polymer planar waveguide amplifier doped with $\text{LiYF}_4:\text{Er}, \text{Yb}$ nanocrystals[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0206001.
陈 曦, 王天娇, 刘树森, 等. 掺杂 $\text{LiYF}_4:\text{Er}, \text{Yb}$ 纳米晶的聚合物平面光波导放大器[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0206001.
- 12 Wong W H, Chan K S, Pun E Y B, *et al.*. Ultraviolet direct printing of rare-earth-doped polymer waveguide amplifiers[J]. Appl Phys Lett, 2005, 87(1): 011103.
- 13 Bo S H, Hu J, Chen Z, *et al.*. Core-shell $\text{LaF}_3:\text{Er}, \text{Yb}$ nanocrystal doped sol-gel materials as waveguide amplifiers[J]. Appl Phys B, 2009, 97(3): 665-669.
- 14 Lei Ka-Long, Chow Cheuk-Fai, Tsang Kwok-Chu, *et al.*. Long aliphatic chain coated rare-earth nanocrystal as polymer-based optical waveguide amplifiers[J]. J Mater Chem, 2010, 20: 7526 - 7529.
- 15 Liu Xinyang, Chen Xi, Zhai Xuesong, *et al.*. NaYF_4 nanocrystals with intense 1530 nm fluorescence for polymer optical waveguide amplifiers [J]. J Nanosci Nanotechnol, 2014, 14(5): 3499-3502.
- 16 Zhang Dan, Chen Cong, Wang Fei, *et al.*. Optical gain and upconversion luminescence in $\text{LaF}_3:\text{Er}, \text{Yb}$ nanoparticles-doped organic-inorganic hybrid materials waveguid amplifier[J]. Appl Phys B, 2010, 98(4): 791-795.
- 17 Ma Chunsheng, Qin Zhengkun, Zhang Daming. The Design and Simulation of Optical Waveguide Device[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012: 250-284.
马春生, 秦政坤, 张大明. 光波导器件设计与模拟[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012: 250-284.
- 18 Li Tong, Zhang Daming. Optical Design and Preparation of Er^{3+} - Yb^{3+} Co-Doped Polymeric Planar Optical Waveguide Amplifiers[D]. Changchun: Jilin University, 2012: 19-22.
李 彤, 张大明. 镱铒共掺有机聚合物平面光波导放大器的优化设计与制备[D]. 长春: 吉林大学, 2012: 19-22.
- 19 Zhai Xuesong, Liu Shusen, Liu Xinyang, *et al.*. Sub-10 nm $\text{BaYF}_3:\text{Yb}^{3+}, \text{Er}^{3+}$ core-shell nanoparticles with intense 1.53 μm fluorescence for polymer-based waveguide amplifiers[J]. J Mater Chem C, 2013, 1: 1525-1530.
- 20 Liu Xinyang, Wang Fei. Er^{3+} - Yb^{3+} Co-Doped Nanocrystals Polymeric Planar Optical Waveguide Amplifier[D]. Changchun: Jilin University, 2013: 26-27.
刘馨阳, 王 菲. 镱铒纳米颗粒掺杂有机聚合物平面光波导放大器的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013: 26-27.

栏目编辑: 王晓琰