文章编号 2095-1531(2017)02-0219-07

键合型掺铒纳米晶-聚合物波导放大器的制备

李 彤[1],张美玲[2],王 菲[2*],张大明[2],汪国平[1]
(1. 深圳大学 电子科学与技术学院,广东省微纳光机电工程技术重点实验室,
光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室,广东 深圳 518060;
2. 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:为了克服主客掺杂型有源材料均匀性和稳定性差的问题,采用键合掺杂方法,将高温热解法制备的油酸修饰掺铒氟钇钠纳米晶粒与甲基丙烯酸甲酯发生共聚反应,形成键合型有源芯层材料。纳米晶粒均匀固定在聚合物分子链上,抑制了高浓度掺杂时的团聚析出且材料更稳定。纳米粒子在聚合物中的质量百分比达到约 1wt%,具有良好的成膜性,用原子力显微镜照片观察薄膜表面粗糙度为 1.76 nm。用椭偏仪测量薄膜光学性质,并用柯西色散模型拟合出薄膜折射率随波长的变化关系,材料在 1 550 nm 信号光波长的折射率为 1.485。设计嵌入式波导结构,采用有限元方法进行模式分析和计算光场强度分布。采用紫外光刻和感应耦合等离子体刻蚀工艺制备凹槽形下包层,填充有源材料制备条形波导放大器。实验结果表明,当 1 550 nm 信号光功率为 0.1 mW,1 480 nm 泵浦光功率为 390 mW 时,在 1.2 cm 长的样品中得到了 3.58 dB 的信号光相对增益。

关 键 词:光波导放大器;集成光学器件;聚合物;光增益
中图分类号:TN256 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20171002.0219

Fabrication of optical waveguide amplifiers based on bonding-type $NaYF_4$:Er nanoparticles-polymer

LI Tong[1], ZHANG Mei-ling[2], WANG Fei[2*], ZHANG Da-ming[2], WANG Guo-ping[1]
(1. *College of Electronic Science and Technology and Guangdong Provincial Key Laboratory of Micro/Nano Optomechatronics Engineering and Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, Shenzhen University, Shenzhen* 518060, *China*;
2. *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*)
* *Corresponding author, E-mail: wang_fei@jlu.edu.cn*

Abstract: In order to improve the uniformity and stability of the rare earth doped active materials, a copoly-

收稿日期:2016-10-26;**修订日期**:2016-12-08
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11274247, No. 11574218, No. 11504243, No. 61475061),广东省自然科学基金资助项目(No. 2016A030313042, No. 2015A030310400)
Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 11274247, No. 11574218, No. 11504243, No. 61475061); Guangdong Provincial Natural Science Foundation of China (No. 2016A030313042, No. 2015A030310400)

merization typed material is presented to fabricate the waveguide amplifiers. Oleic acid (OA)-$NaYF_4$:Er nanoparticles are synthesized by the high-temperature pyrolysis, and the active core materials are prepared by the copolymerization of the outermost oleic acid of the nanoparticles and methylmethacrylate(MMA). The concentration of nanoparticles in the active materials is about 1wt%. Atomic force microscopy image shows that the active film is very smooth, and the root mean square is about 1.76 nm. Ellipsometry is used to measure the refractive index of the material, which is about 1.485 at 1 550 nm wavelength. Embedded single-mode waveguides are designed. The distributions of electric field intensity and the transmission mode are simulated by finite element method. The waveguide amplifiers are prepared by the photolithography and inductively coupled plasma. The experimental results show that the relative gains of 3.58 dB is obtained in a 1.2 cm long device, when the pump power is 390 mW at 1 480 nm wavelength and the signal power is 0.1 mW at 1 550 nm wavelength.

Key words: optical waveguide amplifier; integrated optical devices; polymer; optical gain

1 引 言

硅基片上光电子器件由于具有更快的处理速度、更高的带宽、与半导体(Complementary metal oxide semiconductor, CMOS)工艺良好的兼容性,引起了广泛的关注[1-4]。随着制备技术的发展,已经在激光器、高速光调制器、高速光电探测器等应用中取得重大进展[5-9]。然而,片上器件的高密度集成给光电子系统的信号传输带来更大的挑战,特别是对光子器件间信号的互连损耗补偿提出更高要求。与传统的中继放大器相比,波导光放大器避免了复杂的光-电-光转换过程,可以实现光互连中的信号光的直接光放大或损耗补偿,是解决集成光路全光中继的关键。硅材料由于其间接带隙结构,不适合用于制作有源光器件[10]。而传统的拉曼光放大器需要外接一个强的泵浦源来实现光放大[11],这不利于片上光互连的实现。掺铒光波导放大器(Erbium doped waveguide amplifier, EDWA)具备掺铒光纤放大器(Erbium doped fiber amplifier, EDFA)的偏振串扰无关性、噪声指数低等优势,通过高浓度掺杂,实现单位长度高增益,结构简单紧凑,在集成光子系统上极具发展前景。相较于铌酸锂晶体、硅酸盐玻璃、磷酸盐玻璃、及氧化物陶瓷薄膜等无机材料,有机聚合物 EDWA 的材料种类多样、折射率易调节、制备工艺简单、成本低廉,利于制备高密度的集成器件[12-13]。

聚合物中富含 C—H、O—H 等高能振动基团,其倍频波长(C—H: 1 700 nm, O—H: 1 350 nm)与铒离子(Er^{3+})的放大波长 1 550 nm 相近,易产生与 Er^{3+} 的振动耦合,降低 Er^{3+} 发光效率,荧光寿命仅为十几微秒[14]。将 Er^{3+} 掺杂于氟化镧(LaF_3)等纳米晶体颗粒是提高 Er^{3+} 发光效率的一个有效方法。Er^{3+} 替代 La^{3+} 在纳米晶格中的位置,受 LaF_3 刚性骨架保护,有机基质对 Er^{3+} 的影响被减弱,荧光寿命可达到百微秒[15]。近年来,研究人员对掺杂纳米颗粒进行了一系列研究[12-13,16-20]。其中,2013 年,ZHAI X S 等人[17]合成了 $BaYF_5$:Yb^{3+},Er^{3+} 芯-壳结构,在器件中获得了 6.3 dB 的相对增益。2014 年,LIU X Y 等人[13]合成了铒镱共掺氟钇钠($NaYF_4$)纳米颗粒掺杂的 SU8 聚合物,制备了相对增益 3.3 dB 的 1 520 nm波长光放大器。

然而,上述这些工作都采用了主客型掺杂方法,即将纳米粒子溶解在有机溶剂中,然后直接掺杂到聚合物基质中。这种简单的物理掺杂,纳米粒子在有机基质中的掺杂浓度和均匀性难以提高,影响波导放大器的增益性能和寿命。针对这一问题,本文结合纳米粒子良好的发光性能,采用键合掺杂的方法,利用油酸的不饱和官能团与甲基丙烯酸甲酯(MMA)一起发生共聚反应,将纳米粒子键合到聚合物分子链上,合成了一种新型的键合型掺铒 $NaYF_4$ 纳米晶-聚合物材料,用于制备光波导放大器。这种方法将纳米粒子均匀分散在

聚合物分子链上,有效减少了高浓度掺杂时的团聚析出,有利于提高铒离子浓度。另一方面,每个粒子单元都被 PMMA 分子链围绕扭曲,粒子像圈在笼中,相互作用微弱,老化聚集不易生成,材料更加稳定[21],有利于器件保持良好的通光性与光放大性能。由于硅材料对 980 nm 泵浦具有强吸收[22],为了实现该有源材料在片上硅基光系统中的应用,我们在 1 480 nm 泵浦下研究其增益特性。

2　掺铒波导放大器的工作原理

在掺铒光波导放大器中,Er^{3+} 离子通过受激辐射实现放大信号光。在 1 480 nm 泵浦光的作用下,经受激吸收,基态能级($^4I_{15/2}$)的 Er^{3+} 离子跃迁到激发态能级($^4I_{13/2}$)中较高的一些 Stark 劈裂子能级上,然后经过热弛豫到达$^4I_{13/2}$中较低的一些 Stark 劈裂子能级上,并停留较长时间。当泵浦光大于阈值功率时,Er^{3+} 离子的$^4I_{15/2}$和$^4I_{13/2}$能级粒子数发生反转,此时在信号光作用下,发生受激辐射跃迁($^4I_{13/2}\rightarrow{}^4I_{15/2}$),产生与信号光完全相同的光子,实现信号光的功率放大。图 1 所示为 EDWA 在 1 480 nm 泵浦下,1 550 nm 信号光的放大原理示意图。

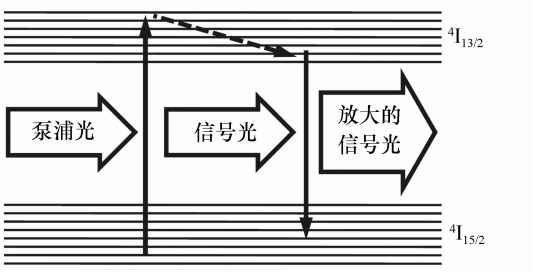

图 1　掺铒放大器在 1480 nm 泵浦下的光放大原理示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the principle of Erbium-doped amplifier under 1480 nm pumping light

3　实验与结果

3.1　键合型掺铒氟钇钠纳米晶-聚合物的制备

首先通过高温热解法合成油酸表面修饰的掺铒氟钇钠纳米颗粒:将 1 mmol $LnCl_3\cdot 6H_2O$($Ln=Y_{0.9}Er_{0.1}$)、15 mL 十八烯、及 6 mL 油酸混合,在 Ar 气保护下,加热到 100 ℃并保持 10 min,然后升温到 150 ℃下搅拌溶解后自然冷却到室温;将 2.5 mmol NaOH、4 mmol NH_4F 溶解在 10 mL的甲醇中,并缓慢滴加到稀土有机溶液中后,在 50 ℃下挥发 60 min;待甲醇去除后,在 Ar 气保护下,升温至 310 ℃,60 min后自然冷却到室温;通过离心、洗涤及烘干后得到油酸修饰的 $NaYF_4$:10% Er 纳米晶粒粉末。F^- 离子的扩散快,先生成纳米核,Er^{3+} 离子按比例替代晶格上的 Y^{3+} 离子;而后油酸再与纳米核外层作用形成表面修饰层,终止纳米核生长,纳米晶粒径约为 20 nm。将粉末溶解在环已烷有机溶剂中,添加到事先进行过预聚合处理(60 ℃,30 min)的甲基丙烯酸甲酯(Methyl methacrylate,MMA)中形成混合物。随着共聚反应的进行,混合物逐渐成为透明胶状液体,即为纳米粒子共价键和 PMMA 形成的复合材料(OA-$NaYF_4$:Er-PMMA)。该材料中纳米粒子在聚合物中的质量百分比达到约 1%,明显高于掺杂型的 0.1 ~ 0.3%[12-13,17]。图 2 为 OA-$NaYF_4$:Er、OA、MMA 及 OA-$NaYF_4$:Er-PMMA 的分子结构示意图。

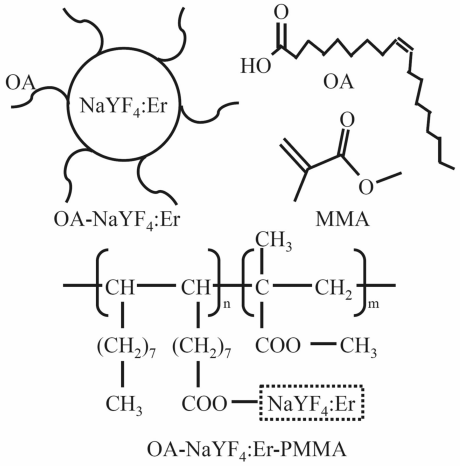

图 2　OA-$NaYF_4$:Er-PMMA 的分子结构示意图

Fig. 2　Structure scheme of the OA-$NaYF_4$:Er-PMMA

将溶液旋涂(900 rad/min, 9 s; 3 500 rad/min,20 s)在硅片上,在烘箱中固化充分(100 ℃,2.5 h)聚合成膜。图 3 中插图(a)为

薄膜剖面显微镜照片,厚度约为 8 μm。用原子力显微镜(Atomic force microscopy, AFM)来观测 OA-$NaYF_4$:Er-PMMA 薄膜的表面平整度。如图 3 中插图(b)所示,测量范围为 10 μm × 10 μm,表面粗糙度的均方根(Root mean square, RMS)为 1.76 nm,说明材料成膜性好,适合用于制备光波导器件。通过非接触式的椭偏仪测量材料的光学性质,采用柯西(Cauchy)色散模型拟合出薄膜折射率随波长的变化,如图 3 所示,在 1 550 nm 处,薄膜折射率约为 1.485。

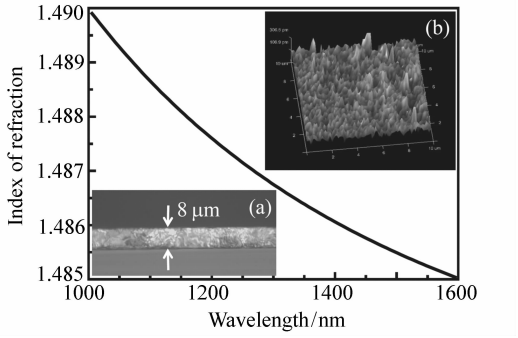

图 3 复合材料 OA-$NaYF_4$:Er-PMMA 的折射率随波长变化曲线(a)薄膜剖面显微镜照片(b)薄膜 AFM 照片

Fig. 3 Curve of refraction index of the OA-$NaYF_4$:Er-PMMA with different wavelength. The inset (a) shows the microscope photo of the cross section of the film. The inset (b) shows the AFM image of the surface of the film

3.2 波导放大器的单模结构设计

纳米颗粒中的 Y、Er 元素与氧结合后,会在样品表面形成残留物,无法被 O_2、SF_6 和 CF_4 等常用刻蚀气体带走,并阻挡反应气体深入刻蚀材料[23],波导结构难以形成。为此,我们设计了一种嵌入式波导结构,即有源芯层填充 PMMA 凹槽,如图 4(a)所示。选取 PMMA 凹槽宽度 a = 9 μm,凹槽深度 h = 4 μm,填充凹槽后固化的波导芯层厚度 b = 12 μm,上下包层 PMMA 在 1 550 nm波长下的折射率为 1.483,利用有限元法(Finite element method, FEM)对波导进行模式分析并得到两个模式,波导有效折射率[24]分别为 N_{eff_1} = 1.484 2 和 N_{eff_2} = 1.484 1,N_{eff_2}对应的电场强度分布约为 N_{eff_1} 的 1/10,可忽略不计,信号光在该尺寸结构中可近似视为单模传输。图 4(b)和 4(c)分别为 N_{eff_1}对应的电场强度分布的等高线图和三维曲面图,光强被很好的限制在有源掺铒区域,有利于信号光的传输,及充分与稀土离子作用。

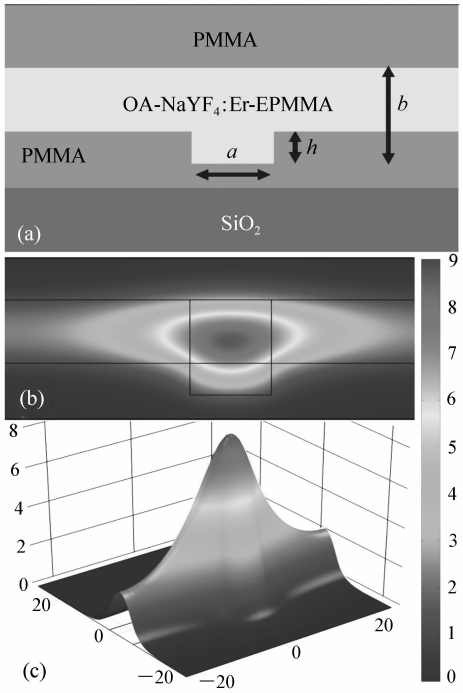

图 4 波导放大器的结构设计(a)嵌入式波导结构示意图(b)波导中传输的电场强度分布的等高线图(c)电场强度的三维曲面图

Fig. 4 Structure design of waveguide amplifiers. (a) cross section of the embedded waveguides, (b) color contour and (c) three-dimensional surface plot of the distribution of electric field intensity of the waveguide

3.3 波导放大器的制备与测试

图 5 为嵌入式波导放大器的制备流程。在经过丙酮乙醇去离子水清洗干净的二氧化硅(SiO_2)片上旋涂一层未添加纳米粒子的 PMMA 作为包层材料;烘箱中(120 ℃,2 h)交联固化后,在上面真空蒸镀一层约 50 nm 的铝掩膜,并旋涂光刻胶;用设计好的光刻板进行紫外曝光,显影光刻胶及铝掩膜,使其形成波导图形;用感应耦合等离子体

(Inductively coupled plasma,ICP)刻蚀机,氧气刻蚀形成 PMMA 凹槽结构;洗去残留的铝膜后,旋涂制备好的有源芯层 OA-$NaYF_4$:Er-PMMA 材料,固化后旋涂 PMMA 上包层,完成器件的制备。

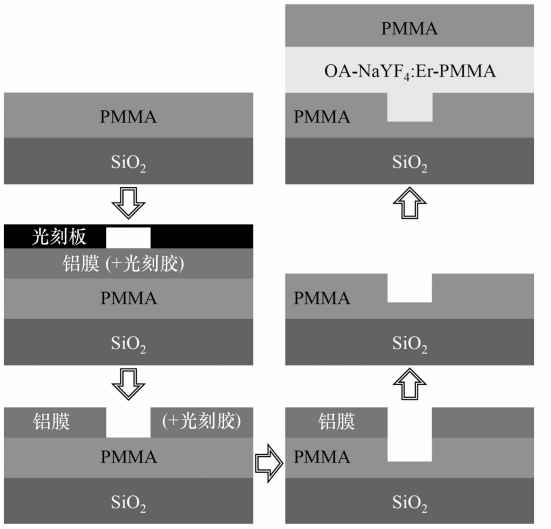

图 5　嵌入式结构波导放大器的制备流程图

Fig. 5　Fabrication process of embedded waveguide amplifiers

图 6(a)为填充有源芯层前 PMMA 凹槽(宽 9 μm,深 4 μm)的扫描电镜(Scanning electron microscope,SEM)照片,经过 ICP 刻蚀工艺参数研究[25],得到了陡直平滑的 PMMA 凹槽,有利于降低器件损耗。将填充了有源芯层后的样品两端自然解理,通过光纤与波导的直接端面耦合进行放大器的增益测试。泵浦光与信号光分别由两台激光器发出,经波分复用器合波,由输入光纤直接耦合进入波导放大器样品,泵浦光与放大后的信号光在出射端耦合进入输出光纤后,被光谱仪记录。图 6(b)所示为波导放大器与光纤的直接端面耦合实物图,当泵浦光为 980 nm 激光时,器件表面沿波导传播方向有清晰明亮的绿色上转换发光[26]。图 6(c)所示为 1 480 nm 泵浦下,波导放大器的相对增益[17]随泵浦光功率的变化曲线。信号光功率为 0.1 mW,器件波导长 1.2 cm,信号光相对增益随泵浦光功率增大而增大,并达到饱和,当泵浦光功率为 390 mW 时,获得了 3.58 dB 的信号光相对增益。

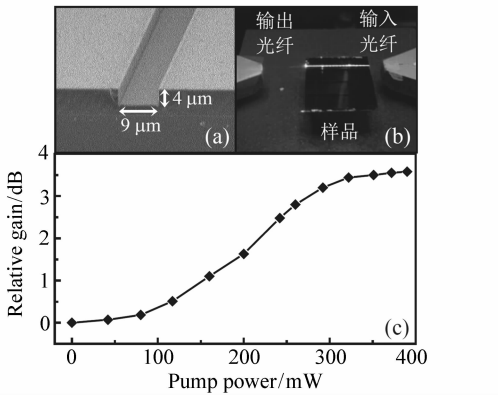

图 6　波导放大器的增益测试(a)刻蚀的 PMMA 凹槽的 SEM 照片;(b)980 nm 泵浦下,器件表面沿波导传输线的上转换发光照片;(c)1480 nm泵浦下,波导放大器的相对增益随泵浦光功率的变化曲线

Fig. 6　Gain test of the waveguide amplifier. (a) SEM micrograph of a 9 μm wide and 4 μm deep groove of PMMA cladding, (b) photo of up-conversion fluorescence along a waveguide under 980 nm pumping, (c) relative gain as a function of pump power under 1480 nm pumping light

4　结　论

本文通过油酸表面修饰掺铒氟钇钠纳米晶体粒子与甲基丙烯酸甲酯发生共聚反应,使纳米粒子以共价键形式生长在聚合物分子链上,生成键合型有源芯层材料,避免了主客型芯层材料稳定性差、掺杂不均匀的问题。该材料中纳米粒子在聚合物中的质量百分比达到约 1%。用这种材料固化烘干制备的薄膜具有良好的成膜性及表面平整度。用椭偏仪拟合材料折射率与光波长的关系,得到在 1 550 nm 波长处其折射率为 1.485。设计了嵌入式波导结构,用有限元法分析波导模式特性及电场强度分布。用铝掩膜紫外光刻和 ICP 刻蚀工艺,制备 PMMA 凹槽形下包层,填充键合型芯层材料并旋涂上包层,得到条形波导放大器。为了避开硅基器件对 980 nm 泵浦光的强吸收,采用 1 480 nm 泵浦光进行增益测试。信号光(1 550 nm)功率为 0.1 mW,泵浦光(1 480 nm)功率为 390 mW 时,在 1.2 cm 长的样品中得到了

3.58 dB 的信号光相对增益。

参考文献：

[1] CHEN R, TRAN T T D, NG K W, *et al.*. Nanolasers grown on silicon[J]. *Nat. Photonics*, 2011, 5: 170-175.

[2] YAN Z, LI C, LUO Y, *et al.*. Silver hierarchical structures grown on microstructured silicon in chip for microfluidic integrated catalyst and SERS detector[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2015, 13(10): 102401-102405.

[3] 周吉，贺志宏，于孝军，等. 硅基半导体多场耦合下的光传输及电调控特性分析[J]. 发光学报，2016，37(1)：63-73.
ZHOU J, HE ZH H, YU X J, *et al.*. Optical transmission and electrical modulation for silicone semiconductor with multi-field effect[J]. *Chinese J. Luminescence*, 2016, 37(1): 63-73. (in Chinese)

[4] 周政，李金华，方芳，等. 化学气相沉积法制备 Zn_2GeO_4 纳米线及其发光性质的研究[J]. 中国光学，2014，7(4)：282-286.
ZHOU ZH, LI J H, FANG F, *et al.*. Zn_2GeO_4 nanowires prepared by chemical vapor deposition and its luminescence properties[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 282-286. (in Chinese)

[5] TING Y T, FENG W F, YANG X Y, *et al.*. Graphene coupled with silicon quantum dots for high-performance bulk-silicon-based schottky-junction photodetectors[J]. *Adv. Mater.*, 2016, 28(24): 4912-4919.

[6] YANG S Y, ZHANG Y, LI Q, *et al.*. Quantum dot semiconductor optical amplifier/silicon external cavity laser for O-band high-speed optical communications[J]. *Opt. Eng.*, 2015, 54(2): 026102-5.

[7] SONG S J, YI X K, CHEW S X, *et al.*. Optical single-sideband modulation based on silicon-on-insulator coupled-resonator optical waveguides[J]. *Opt. Eng.*, 2016, 55(3): 031114-6.

[8] 刘杰，铁生年，卢辉东. 多信道二维光子晶体滤波器[J]. 光学 精密工程，2016，24(5)：1021-1027.
LIU J, TIE SH N, LU H D. Multi-channel drop filter based on two-dimensional photonic crystal[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(5): 1021-1027. (in Chinese)

[9] 管小伟，吴昊，戴道锌. 硅基混合表面等离子体纳米光波导及集成器件[J]. 中国光学，2014，7(2)：181-195.
GUAN X W, WU H, DAI D X. Silicon hybrid surface plasmonic nano-optics-waveguide and integration devices[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 181-195. (in Chinese)

[10] KOOS C, VORREAU P, VALLAITIS T, *et al.*. All-optical high-speed signal processing with silicon-organic hybrid slot waveguides[J]. *Nat. Photonics*, 2009, 3: 216-219.

[11] SINGH A. Influence of carrier transport on Raman amplification in silicon waveguides[J]. *Opt. Express*, 2010, 18(12): 12569-80.

[12] LEI K L, CHOW C F, TSANG K C, *et al.*. Long aliphatic chain coated rare-earth nanocrystal as polymer-based optical waveguide amplifiers[J]. *J Mater. Chem.*, 2010, 20(35): 7526-7529.

[13] LIU X Y, CHEN XI, ZHAI X S, *et al.*. $NaYF_4$ nanocrystals with intense 1530 nm fluorescence for polymer optical waveguide amplifiers[J]. *J. Nanosci. Nanotechnol.*, 2014, 14(5): 3499-3502.

[14] 张丹. 掺铒有机聚合物光波导放大器的理论研究与实验制备[D]. 吉林：吉林大学，2008.
ZHANG D. An experimental and theoretical study on erbium-doped polymer waveguide amplifier[D]. Jilin: Jilin University, 2008. (in Chinese)

[15] LI T, LIU T J, CHEN C, *et al.*. Gain characteristics of LaF_3: Er, Yb nanoparticle-doped waveguide amplifier[J]. *J Nanosci. Nanotechnol.*, 2011, 11: 9409-9414.

[16] LI T, ZHANG D, CHEN C, *et al.*. Optical properties of LaF_3: Er, Yb nanoparticle-doped organic inorganic hybrid material [J]. *J Nanosci. Nanotechnol.*, 2010, 10: 2169-2172.

[17] ZHAI X S, LIU S S, LIU X Y, *et al.*. Sub-10 nm $BaYF_5$: Yb^{3+}, Er^{3+} core-shell nanoparticles with intense 1.53 μm fluorescence for polymer-based waveguide amplifiers[J]. *J. Mater. Chem. C*, 2013, 1(7): 1525-1530.

[18] ZHAI X S, LI J, LIU S S, *et al.*. Enhancement of 1.53 μm emission band in $NaYF_4$: Er^{3+}, Yb^{3+}, Ce^{3+} nanocrystals for polymer-based optical waveguide amplifiers[J]. *Opt. Mater. Express*, 2013, 3(2): 270-277.

[19] LIU S,GUO X,ZHAI X,*et al*.. Oleic acid-modified $LiYF_4$:Er,Yb nanocrystals for potential optical-amplification applications[J]. *J Nanosci. Nanotechnol.*,2014,14(5):3718-3721.

[20] ZHAO P C,ZHANG M L,WANG T J,*et al*.. Optical amplification at 1525 nm in $BaYF_5$:20% Yb^{3+},2% Er^{3+} nanocrystals doped SU-8 polymer waveguide[J]. *J. Nanomater.*,2014,2014:153028.

[21] 徐存进.键合型强荧光稀土聚合物的设计合成与性能研究[D].浙江:浙江大学化学工程与生物工程,2011.
XU C J. Synthesis and properties of the highly luminescent bonding-type rare earth polymer[D]. Zhejiang:Department of Chemical and Biological Engineering,Zhejiang University,2011. (in Chinese)

[22] PINTUS P,FARALLI S,PASQUALE F D,*et al*.. Integrated 2.8 μm laser source in Al_2O_3:Er^{3+} slot waveguide on SOI[J]. *J. Lightwave Technol.*,2011,29(8):1206-1212.

[23] CHEN C,ZHANG D,LI T,*et al*.. Erbium-ytterbium codoped waveguide amplifier fabricated with solution-processable complex[J]. *Appl. Phys. Lett.*,2009,94(4):041119-3.

[24] SARVAGYA D,ALFONSO R,MICHAEL V,*et al*.. Experimental extraction of effective refractive index and thermo-optic coefficients of silicon-on-insulator waveguides using interferometers[J]. *J. Lightwave Technol.*,2015,33(21):4471-4477.

[25] ZHANG K,YUE Y B,LI T,*et al*.. Application of ICP etching in fabrication of polymer optical waveguide[J]. *Chinese Optics*,2012,5(1):64-70.

[26] GHIZAL F A,MAHAJAN S K. Intense cooperative upconversion emission in Yb/Er:TeO_2-Li_2O-WO_3 oxyfluoride glass ceramics[J]. *J. Lumin.*,2014,156:97-101.

作者简介:

李　彤(1984—),女,吉林长春人,博士后,主要从事平面光波导放大器方面的研究。E-mail:litong0722@foxmail.com

王　菲(1978—),女,黑龙江哈尔滨人,副教授,主要从事平面光波导集成器件方面的研究。E-mail:wang_fei@jlu.edu.cn