

基于 LED 泵浦的掺钕聚合物光波导放大器性能研究

杨星辰¹, 周兆琴¹, 满意², 许辉^{2**}, 张丹^{1*}¹厦门大学电子科学与技术学院(国家示范性微电子学院), 福建 厦门 361005;²黑龙江大学化学化工与材料学院功能无机材料化学教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080

摘要 以双齿膦氧化合物 4,6-二(二苯基氧膦基)二苯并噻吩(DBTDPO)为中性配体,以噻吩基三氟甲基乙酰丙酮(TTA)为阴离子配体,制备了具有分子内能量传递作用的稀土钕配合物 Nd(TTA)₃DBTDPO 掺杂聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)溶液聚合物材料。采用 Ag⁺-K⁺ 离子交换法和一步光刻法,分别制备了基于倏逝波型的 BK-7 玻璃波导和 SU-8 聚合物波导。采用成本低廉的发光二极管(LED)替代半导体激光器作为泵浦源,利用有机配体与中心稀土 Nd³⁺ 离子的分子内能量传递作用,在 225 mW 405 nm LED 泵浦下,在 1.06 μm 波长处分别获得了 3.6 dB/cm 和 4.1 dB/cm 的光增益。所提出的基于分子内能量传递作用的 LED 垂直顶泵浦方式能够有效降低器件的商用化成本,有望在平面光子集成领域得到广泛应用。

关键词 激光器; 波导放大器; 钕配合物; 1.06 μm; 倏逝波; LED 泵浦

中图分类号 TN256 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL220639

1 引言

稀土掺杂光波导放大器可以与耦合器、阵列波导光纤光栅、光开关、调制器等器件集成在一起来补偿平面光子集成中的光信号损耗。稀土钕(Nd³⁺)离子在近红外波长 1.06 μm 和 1.33 μm 处的发射可以用来实现激光器以及光通信第二窗口的光放大,因而近年来成为研究的热点。按照 Nd³⁺ 离子掺杂基质的不同,掺钕光波导放大器可以分为无机和有机两类。2015 年, Tan 等^[1]使用质子束写入技术成功制备出 Nd:YAG 波导,在功率为 100 mW 的 800~825 nm 连续激光泵浦下,在 1064 nm 波长处得到最大增益 24 dB/cm。2020 年, Wetter 等^[2]利用飞秒激光技术在掺钕磷酸盐玻璃中制作有源双波导,采用 805 nm 激光器泵浦,在 1064 nm 处得到 3.6 dB/cm 相对光增益。相比于磷酸盐、硅酸盐等无机宿主材料,掺钕聚合物材料体系具有折射率易于调整、制备成本低廉、可以方便地旋涂在各种类型的衬底上及易于与光子器件实现集成等优点而备受关注。2010 年, Yang 等^[3]制备了掺 Nd(TTA)₃phen 聚合物波导,在 800 nm 激光器激发下,在 1064 nm 处测得到 5.7 dB/cm 的净增益。2015 年, Zhang 等^[4]制备了掺 Nd(TTA)₃(TPPO)₂ 的 SU-8 聚合物波导,在 140 mW 808 nm 激光器泵浦下,在 1064 nm 处获得了 2.4 dB/cm 的相对增益。

在稀土钕掺杂聚合物光波导放大器的研究中,一般通过合成钕配合物的方法来解决稀土离子盐类不溶于聚合物的问题。钕配合物另外一个更重要的特点是利用有机配体在 200~450 nm 波长范围内具有连续的吸收带和吸收截面大(10⁻²³~10⁻²² m²)^[5-8]的特点,将吸收的紫外光能量通过分子内能量传递的方式转移给中心 Nd³⁺ 离子,这一能量传递效率是稀土离子间能量传递效率的 5 倍^[5]。然而,受传统光纤放大器和无机光波导放大器研究思路的限制,钕配合物的这一分子内能量传递优势并未得到充分利用,它们仅仅被用来解决稀土离子在聚合物基质中的溶解性问题。目前大多数研究选择采用 808 nm 半导体激光器作为泵浦源,直接激发 Nd³⁺ 离子来实现增益,这往往需要较高的激光功率(100~400 mW)泵浦,容易导致 Nd³⁺ 离子的能量上转换寄生效应和聚合物波导的破坏性热损伤^[9-16]。此外,还需要采用波分复用器(WDM)来耦合 808 nm 泵浦光和 1.06 μm 信号光,这会带来额外的光损耗,同时也增加了器件的商用化成本。

基于此,本文以双齿膦氧化合物 4,6-二(二苯基氧膦基)二苯并噻吩(DBTDPO)为中性配体,以噻吩基三氟甲基乙酰丙酮(TTA)为阴离子配体,制备了具有分子内能量传递作用的稀土钕配合物 Nd(TTA)₃DBTDPO 掺杂 PMMA 聚合物材料。文献^[4]采用 808 nm 激光器作为泵浦源,利用 Nd³⁺ 离

收稿日期: 2022-03-07; 修回日期: 2022-04-06; 录用日期: 2022-04-27; 网络首发日期: 2022-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(61875170, 61107023)、国家重点研发计划(2021YFB2800500)、厦门大学校长基金(20720150086)

通信作者: *zhangdan@xmu.edu.cn; **hxu@hlju.edu.cn

子 $^4I_{9/2}$ 能级到 $^4F_{5/2}$ 能级的本征吸收来实现 $1.06\ \mu\text{m}$ 波长的光放大。不同于上述传统研究方法,本文将 $\text{Nd}(\text{TTA})_3\text{DBTDPO}$ 掺杂聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)作为有源上包层,分别覆盖在BK-7玻璃波导和SU-8聚合物波导上,制备了基于倏逝波结构的掺铈光波导放大器;采用成本低廉的发光二极管(LED)替代半导体激光器作泵浦源,利用有机配体与中心稀土 Nd^{3+} 离子的分子内能量传递作用,在 $1.06\ \mu\text{m}$ 波长处分别实现了 $3.6\ \text{dB/cm}$ 和 $4.1\ \text{dB/cm}$ 的相对光增益。

本文制备的稀土铈配合物 $\text{Nd}(\text{TTA})_3\text{DBTDPO}$ 掺杂PMMA聚合物材料,可方便地旋涂在绝缘体上硅(SOI)波导、氮化硅波导、聚合物波导及玻璃等各种类型的波导器件上,通过倏逝波耦合的方式形成 $1.06\ \mu\text{m}$ 光信号损耗补偿,具有普适性。本文提出的基于分子内能量传递作用的LED垂直顶泵浦方式,能够大大降低器件的商用化成本,具有潜在的市场应用价值。

2 实验准备

2.1 铈配合物的吸收与发射

以双齿膦氧化物DBTDPO为中性配体,以TTA为阴离子配体,合成了稀土铈掺杂的配合物 $\text{Nd}(\text{TTA})_3\text{DBTDPO}$ 材料,具体合成方法可见文献[13]。采用分光光度计测量室温下铈配合物材料的吸收光谱,并将其与铈离子无机盐 $\text{NdCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 作对比,如图1所示。在 $\text{Nd}(\text{TTA})_3\text{DBTDPO}$ 和 $\text{NdCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 粉末的吸收光谱中,均可在 523 、 581 、 745 、 802 、 $872\ \text{nm}$ 波长处观测到 Nd^{3+} 离子的5个本征吸收峰,它们分别与 Nd^{3+} 离子从基态能级 $^4I_{9/2}$ 到激发态能级 $^4G_{7/2}+^4G_{9/2}+^2K_{13/2}$ 、 $^4G_{5/2}+^2G_{7/2}$ 、 $^4F_{7/2}+^4S_{3/2}$ 、 $^4F_{5/2}+^2H_{9/2}$ 和 $^4F_{3/2}$ 的跃迁对应。同时,在 $300\sim 410\ \text{nm}$ 波长范围内,铈配合物存在一个明显的、连续较大的吸收截面,这是中性配体DBTDPO、阴离子配体TTA的

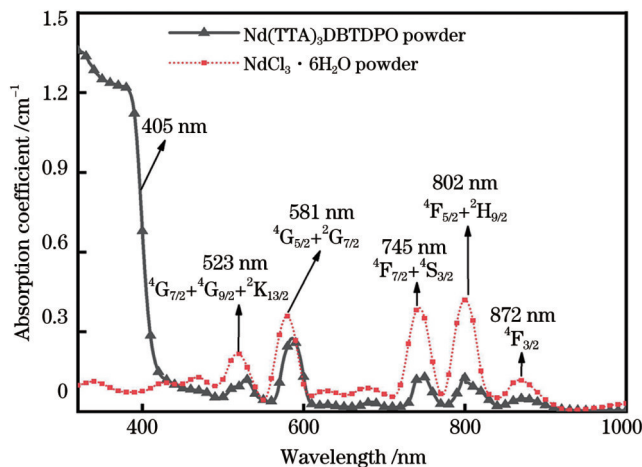


图1 $\text{Nd}(\text{TTA})_3\text{DBTDPO}$ 和 $\text{NdCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 粉末的吸收光谱
Fig. 1 Absorption spectra of $\text{Nd}(\text{TTA})_3\text{DBTDPO}$ powder and $\text{NdCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ powder

吸收造成的^[5]。如果采用低功率蓝紫光LED激发 $\text{Nd}(\text{TTA})_3\text{DBTDPO}$,可以实现配体的高效吸收。

将 $0.01\ \text{g}$ 铈配合物 $\text{Nd}(\text{TTA})_3\text{DBTDPO}$ 溶解在 $0.2\ \text{mL}$ 二甲基甲酰胺(DMF)中,磁力搅拌待充分溶解后,将其掺杂在 $0.8\ \text{g}$ PMMA中,制备成有源掺杂的聚合物材料,其中 Nd^{3+} 离子的质量分数约为 1% ,将有源聚合物溶液放置在真空烘箱中,在 $120\ ^\circ\text{C}$ 下烘干溶剂,制作出厚度为 $100\ \mu\text{m}$ 的有源薄膜。在不同功率的 $405\ \text{nm}$ LED激发下,该薄膜的荧光发射光谱如图2所示。可以看到 Nd^{3+} 离子在 $1.06\ \mu\text{m}$ 波长处的荧光发射,该发射峰是由 Nd^{3+} 离子从激发态能级 $^4F_{3/2}$ 到基态能级 $^4I_{11/2}$ 的辐射跃迁造成的,荧光半峰全宽约为 $26\ \text{nm}$,且发光强度随蓝紫光LED泵浦功率的增加而线性增长,如图2中插图所示。由吸收谱可知, Nd^{3+} 离子在 $405\ \text{nm}$ 波长处并无明显吸收,但配体DBTDPO、TTA在高效吸收蓝紫光能量后可以通过分子内能量传递的方式将能量转移给 Nd^{3+} 离子,实现了 Nd^{3+} 离子在 $1.06\ \mu\text{m}$ 波长处的近红外发射。

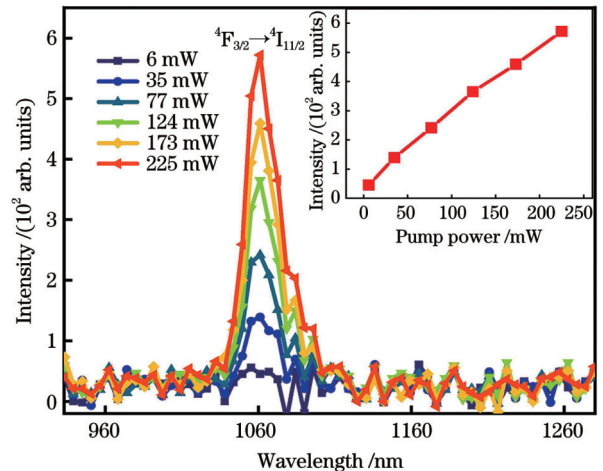


图2 在不同功率的 $405\ \text{nm}$ LED泵浦下 $\text{Nd}(\text{TTA})_3\text{DBTDPO}$ 掺杂的PMMA薄膜的发射光谱

Fig. 2 Emission spectra of $\text{Nd}(\text{TTA})_3\text{DBTDPO}$ doped PMMA film pumped by $405\ \text{nm}$ LEDs with different powers

2.2 光波导的制备与表征

分别采用 Ag^+-K^+ 离子交换法^[17]和一步光刻法制备了BK-7玻璃波导和SU-8聚合物波导,然后将铈配合物 $\text{Nd}(\text{TTA})_3\text{DBTDPO}$ 掺杂的PMMA聚合物作为上包层,分别旋涂在两种波导的上表面,形成倏逝波型光波导放大器器件。采用离子交换法制备BK-7玻璃波导的过程为:在清洗过的玻璃表面上磁控溅射 $100\ \text{nm}$ 厚的铝膜,接着光刻、显影,在玻璃上暴露部分波导通道区域,然后将 $0.04\ \text{g}$ AgNO_3 和 $4\ \text{g}$ KNO_3 均匀混合后置于盛有BK-7玻璃的坩埚中,在温度为 $350\ ^\circ\text{C}$ 的真空烘箱中加热 $1.5\ \text{h}$,形成有折射率差的波导区域。采用一步光刻法制备SU-8聚合物波导的过程较为简单,只需在生长有 $2\ \mu\text{m}$ 厚 SiO_2 的硅片上旋涂SU-8,利用SU-8光刻胶的光敏性质,经过紫外曝光和

显影即可获得矩形波导。在 $1.06 \mu\text{m}$ 近红外波段, BK-7 玻璃的折射率为 1.51, 经过离子交换后的波导折射率为 1.53, SU-8 和 $\text{Nd}(\text{TTA})_3\text{DBTDPO}$ 掺杂 PMMA 的折射率分别为 1.56 和 1.49。图 3(a)、(b) 分别为 BK-7 玻璃波导和 SU-8 聚合物波导的截面示意

图。图 3(c) 为 BK-7 玻璃波导的俯视图, 波导截面尺寸为 $8 \mu\text{m} \times 7 \mu\text{m}$ 。图 3(d) 为覆盖有源上包层的 SU-8 聚合物波导的扫描电镜 (SEM) 图片, 波导截面尺寸为 $8 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ 。图 3(c)、(d) 中的插图均为两种波导的近场输出光斑。

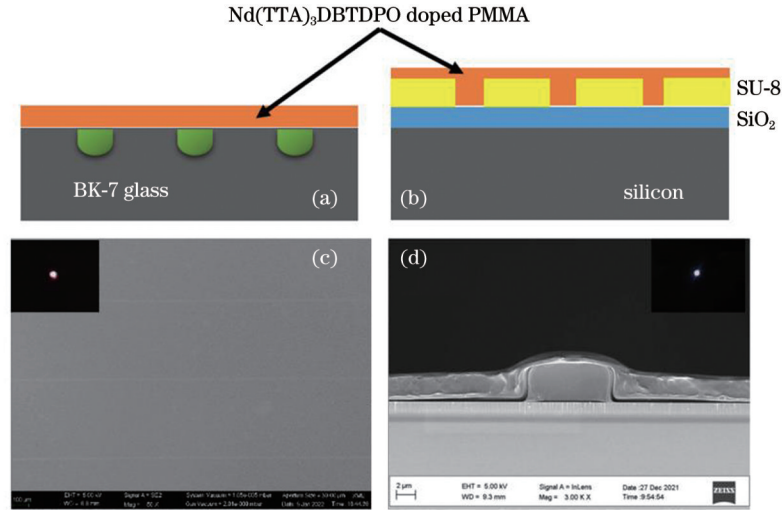


图 3 波导结构的表征。(a) BK-7 玻璃波导的截面示意图; (b) SU-8 聚合物波导的截面示意图; (c) BK-7 玻璃波导的扫描电镜俯视图; (d) 覆盖有源上包层的 SU-8 聚合物波导的截面图

Fig. 3 Characterizations of waveguide structure. (a) Section view of BK-7 glass waveguide; (b) section view of SU-8 polymer waveguide; (c) top SEM view of BK-7 glass waveguide; (d) section view of SU-8 polymer waveguide covering active upper cladding

2.3 增益测试系统

图 4(a) 为 LED 垂直顶泵浦方式下的波导增益测试系统示意图。采用 $1.06 \mu\text{m}$ 激光器作为输入信号光源, 通过单模光纤将输入信号光接入波导, 将 LED 垂直放置在波导顶端作为泵浦光源, 放大的输出信号由单模光纤连接至光谱分析仪 (OSA), 记录当 LED 泵浦光开、关时的输出光强数据。增益测试实验中采用中心波长分别为 405、581、745 nm 的三种 LED 作为泵浦源, 其中选择蓝紫光 405 nm LED 来验证在有机配体与中心稀土 Nd^{3+} 离子的分子内能量传递机制下实现

光增益的可行性。同时, 选择 581 nm 和 745 nm LED 作为泵浦源, 利用 Nd^{3+} 离子在可见光波段 581 nm ($^4\text{G}_{5/2} + ^2\text{G}_{7/2}$) 和 745 nm ($^4\text{F}_{7/2} + ^4\text{S}_{3/2}$) 的本征吸收来激发发光波导, 并与 405 nm LED 激发下的光增益作对比。图 4(b) 为信号光在倏逝波型光波导中的传输示意图。在 LED 泵浦光的辐照下, 波导芯层以倏逝波方式^[18-19]穿透包层, 利用这部分光信号, 可实现上包层 Nd^{3+} 离子的受激发光。倏逝波型光波导的制备方法简单, 可以方便地旋涂在硅基、玻璃等各种类型的波导上, 具有普适性。

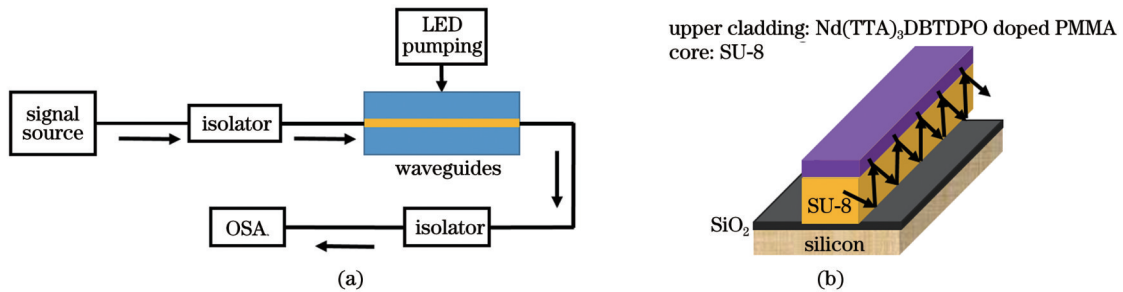


图 4 增益性能测试系统。(a) 实验装置图; (b) 信号光在倏逝波型光波导传播示意图

Fig. 4 Measurement system for gain performance. (a) Diagram of experimental setup; (b) diagram of signal light transmission in evanescent waveguide

3 分析与讨论

根据光波导放大器的相对增益定义公式来测量波

导输出端获得的光增益。相对增益 $G_{\text{rel}}^{[10]}$ 可表示为

$$G_{\text{rel}} = \frac{10 \lg(P_{\text{P+S}}/P_{\text{S}})}{L}, \quad (1)$$

式中: P_{p+s} 和 P_s 分别代表 LED 泵浦光开、关时光谱仪显示的输出信号光强; L 代表波导长度。BK-7 玻璃波导和 SU-8 聚合物波导的长度分别为 1 cm 和 0.8 cm。当输入 0.03 mW 1.06 μm 信号光时, BK-7 玻璃波导输出端的信号光强度与 LED 泵浦功率的关系如图 5(a) 所示。可以看出, 随着 405 nm LED 泵浦功率的增加, 输出信号光的强度呈线性增加趋势。当泵浦功率为 225 mW 时, 可获得 3.6 dB/cm 的相对增益。分别采用 405、581、745 nm 三种波长的 LED 泵浦时, 玻璃波导的增益随泵浦功率的变化如图 5(b) 所示, 输入信号功率均为 0.03 mW。在三种不同波长 LED 激发下, BK-7 玻璃波导都表现出随泵浦功率线性增加的相对增益, 在 225 mW 泵浦功率下, 分别获得了 3.6 dB/cm、2.2 dB/cm、0.9 dB/cm 的相对增益。在相同泵浦功率下, 蓝紫光 405 nm LED 泵浦下的增益值明显强于 581 nm 和 745 nm LED 泵浦, 这说明在

Nd(TTA)₃DBTDPO 配合物中, 有机配体吸收 405 nm LED 紫外光能量, 通过分子内能量传递的方式实现了 Nd³⁺ 离子的受激辐射。相较于采用 581 nm 和 745 nm LED 直接激发 Nd³⁺ 离子的本征吸收带 (⁴G_{5/2}+²G_{7/2}, ⁴F_{7/2}+⁴S_{3/2}) 来实现 Nd³⁺ 离子发光的方法, 这种通过分子内能量传递的方式获得光增益的效果更好。对比 581 nm 和 745 nm 这两种 LED 泵浦波导所产生的增益值, 发现 581 nm LED 作为泵浦源较有优势。当 745 nm LED 的功率增加到 600 mW 时, 在波导中获得了 2.4 dB/cm 的光增益, 这与采用 300 mW 581 nm LED 激发时获得的 2.7 dB/cm 增益值接近, 但泵浦功率几乎增加了一倍。这是由于 581 nm LED 的光谱范围较宽, 覆盖了 Nd³⁺ 离子在 523 nm 和 581 nm 处的两个本征吸收峰。图 5(c) 所示为中心波长分别为 405、581、745 nm 的 LED 的光谱图。

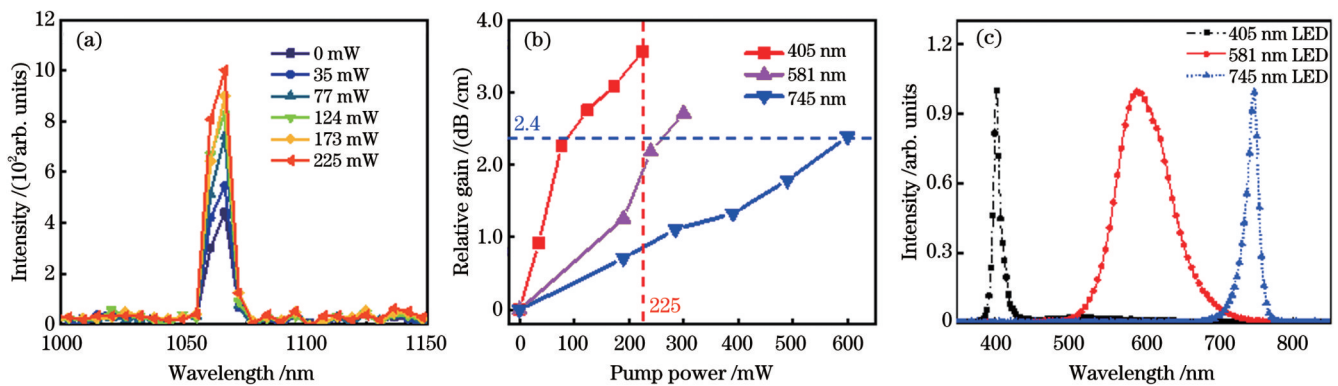


图 5 BK-7 玻璃波导的增益测试结果。(a) 利用 405 nm LED 泵浦时输出信号光强度与泵浦功率的关系; (b) 利用不同波长 LED 泵浦时相对光增益与泵浦功率的关系; (c) 不同波长 LED 泵浦光的光谱图

Fig. 5 Test results for gain in BK-7 glass waveguide. (a) Relationship between output signal intensity and pump power when 405 nm LED is used for pumping; (b) relationship between relative optical gain and pump power when LEDs with different wavelengths are used for pumping; (c) spectra of LED pump light at different wavelengths

与倏逝波型 BK-7 玻璃波导的增益性能相似, 倏逝波型 SU-8 聚合物波导的输出光强也随 LED 泵浦功率的增加呈线性增长趋势, 在 0~225 mW 泵浦功率范围内, 未观察到增益饱和现象。如图 6 所示, 当输入信号

光功率为 0.03 mW 时, 在 77 mW 和 225 mW 405 nm LED 泵浦下, 可以分别获得 2.1 dB/cm 和 4.1 dB/cm 的相对光增益。相较于 BK-7 玻璃波导在 225 mW LED 泵浦下获得的 3.6 dB/cm 增益, 该值略大些。这是由波导结构的不同造成的。如图 3(a) 所示, 在离子交换法制备的 BK-7 玻璃波导中, 只有上表面附着了上包层 Nd(TTA)₃DBTDPO 掺杂的 PMMA 有源材料, 而矩形结构的 SU-8 聚合物波导的上、左、右三个侧面同时被有源上包层包覆, 因此在相同泵浦功率下, 倏逝波型 SU-8 聚合物波导对信号光的放大效果更强一些。

在 405 nm LED 泵浦下, 在稀土钆配合物 Nd(TTA)₃DBTDPO 中, 有机配体和中心 Nd³⁺ 离子的分子内能量传递示意图如图 7(a) 所示。因为使用 1.06 μm 激光器作为信号源, 所以 Nd³⁺ 离子在 1.06 μm 波长处的辐射跃迁概率明显高于在 900 nm (⁴F_{3/2}→⁴I_{9/2}) 和 1.33 μm (⁴F_{3/2}→⁴I_{13/2}) 两个波长处^[4] 的辐射跃迁概率。有机配体和稀土 Nd³⁺ 离子间的传能过

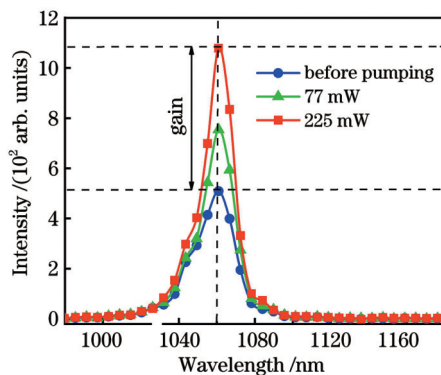


图 6 405 nm LED 泵浦前后波导输出端信号强度的变化

Fig. 6 Change of signal intensity at waveguide output end before and after 405 nm LED pumping

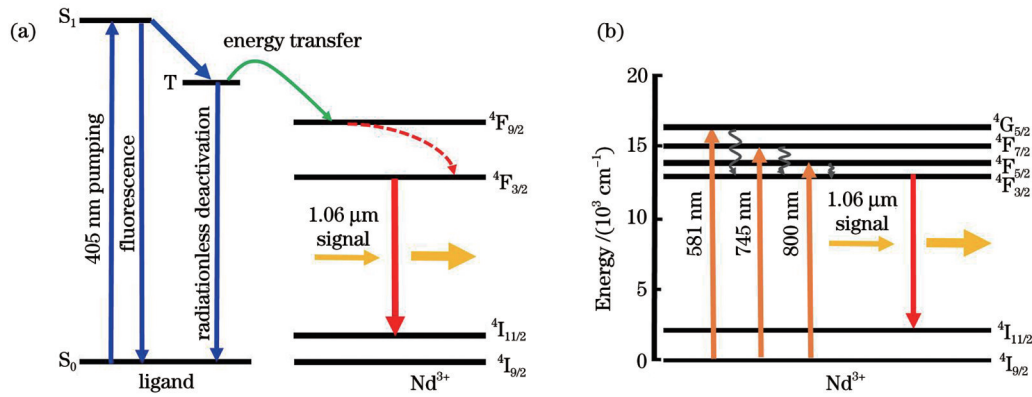


图7 Nd³⁺离子的能级跃迁示意图。(a)有机配体和Nd³⁺离子的传能系统示意图;(b)不同LED泵浦下的Nd³⁺离子跃迁示意图
Fig. 7 Schematics of energy level transition of Nd³⁺ ions. (a) Schematic of energy transfer system for organic ligand and Nd³⁺ ion;
(b) schematic of Nd³⁺ ion transition under pumping of different LEDs

程可描述为:在405 nm紫外光激发下,有机配体发生 $\pi-\pi^*$ 吸收,从单重态S₀跃迁到单重态S₁,再经过系间窜越到三重态T;接着由最低激发三重态T向Nd³⁺离子的振动能级进行能量传递,Nd³⁺离子吸收能量后,从基态能级⁴I_{9/2}跃迁到激发态能级⁴F_{9/2},再通过非辐射跃迁快速弛豫到⁴F_{3/2}能级;在1.06 μm信号光激发下,完成由⁴F_{3/2}能级到基态能级⁴I_{11/2}的辐射跃迁,发出与信号光同频率、同相位的光子,实现信号光的放大。在581、745、800 nm半导体激光器直接泵浦Nd³⁺离子时,Nd³⁺离子的能级跃迁示意图如图7(b)所示。这种泵浦方式是掺钕光波导放大器研究中通常采用的传统方式,由于Nd³⁺离子的本征吸收带较小,相对于基于分子内能量传递作用的蓝紫光LED泵浦方式,它需要高功率的半导体激光器激发来产生粒子数反转,所带来的Nd³⁺离子的寄生上转换效应和波导热损伤问题也难以避免。

4 结 论

以DBTDPO为中性配体,以TTA为阴离子配体,制备了具有分子内能量传递作用的稀土钕配合物Nd(TTA)₃DBTDPO掺杂的PMMA聚合物材料。对材料的吸收、近红外发射性能进行了测试和分析,在405 nm LED泵浦下,聚合物薄膜在1.06 μm波长处的荧光半峰全宽为26 nm。将Nd(TTA)₃DBTDPO掺杂的PMMA作为有源上包层,分别采用Ag⁺-K⁺离子交换法和一步光刻法制备了倏逝波型的BK-7无机玻璃波导和SU-8聚合物波导。在405、581、745 nm三种波长的LED垂直顶泵浦下,获得了两种波导在1.06 μm波长处的相对增益。由于Nd(TTA)₃DBTDPO中的有机配体与Nd³⁺离子之间存在分子内能量传递机制,紫外光405 nm LED泵浦下的增益效果优于Nd³⁺离子本征吸收带581 nm和745 nm LED直接激发的效果。在225 mW 405 nm LED泵浦下,在BK-7无机玻璃波导和SU-8聚合物波导中分别获得了3.6 dB/cm和4.1 dB/cm的光增益。中心波长为581 nm的LED的

光谱范围较宽,覆盖了Nd³⁺离子在523 nm和581 nm处的两个本征吸收带,因此当产生相同增益(~2.4 dB/cm)时,所需的745 nm LED的激发功率比581 nm LED的激发功率增加一倍。由于倏逝波型SU-8聚合物波导的三面被有源上包层包覆,因此在相同泵浦功率下,所获增益比BK-7玻璃波导的高。

所制备的稀土钕配合物Nd(TTA)₃DBTDPO掺杂的PMMA聚合物材料可方便地旋涂在各种类型的波导器件上,通过倏逝波耦合的方式可实现1.06 μm波长的光放大,具有普适性。采用LED垂直顶泵浦方式替代传统的半导体激光器泵浦方式,能够有效降低器件的商用化成本,该方法有望在平面光子集成领域中得到广泛应用。

参 考 文 献

- [1] Tan Y, Shang Z, Vanga S K, et al. High-gain optical waveguide amplifier based on proton beam writing of Nd:YAG crystal[J]. Optics Express, 2015, 23(11): 14612-14617.
- [2] Wetter N U, da Silva D S, Kassab L R P, et al. Double line neodymium doped GeO₂-PbO waveguide amplifier for the second telecom window[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11276: 112760M.
- [3] Yang J, Diemeer M B J, Sengo G, et al. Nd-doped polymer waveguide amplifiers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2010, 46(7): 1043-1050.
- [4] Zhang D, Li X L, Huang X L, et al. Optical amplification at 1064 nm in Nd(TTA)₃(TPPO)₂ complex doped SU-8 polymer waveguide[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(5): 1400607.
- [5] Zhan H, Zhang J, Fan W, et al. Optical properties of organic neodymium complex doped optical waveguides based on the intramolecular energy transfer effect[J]. Optical Materials Express, 2020, 10(10): 2624-2634.
- [6] 陈曦, 王天娇, 刘树森, 等. 掺杂LiYF₄:Er, 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.
Chen X, Wang T J, Liu S S, et al. Polymer planar waveguide amplifier doped with LiYF₄:Er, Yb nanocrystals[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(2): 0206001.
- [7] 尹姣, 曲春阳, 张美玲, 等. 基于钕镱共掺纳米晶的聚合物光波导放大器的增益特性[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1213001.
Yin J, Qu C Y, Zhang M L, et al. Gain characteristics of polymer waveguide amplifiers based on Er³⁺, Yb³⁺Co-doped nanocrystals [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1213001.
- [8] 李彤, 张美玲, 王菲, 等. 键合型掺钕纳米晶-聚合物波导放大器

- 的制备[J]. 中国光学, 2017, 10(2): 219-225.
- Li T, Zhang M L, Wang F, et al. Fabrication of optical waveguide amplifiers based on bonding-type NaYF₄: Er nanoparticles-polymer[J]. Chinese Optics, 2017, 10(2): 219-225.
- [9] 薛家璧, 赖寿强, 刘欣, 等. 基于 LED 泵浦的聚合物光波导吸收特性[J]. 中国激光, 2021, 48(20): 2006003.
- Xue J B, Lai S Q, Liu X, et al. Realizing optical absorption properties of polymer waveguides using LED pump source[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(20): 2006003.
- [10] Fan W, Zhang B P, Wang C, et al. Demonstration of optical gain at 1550 nm in an Er³⁺-Yb³⁺ co-doped phosphate planar waveguide under commercial and convenient LED pumping[J]. Optics Express, 2021, 29(8): 11372-11385.
- [11] Wang J Z, Han C M, Xie G H, et al. Solution-processible brilliantly luminescent EuIII complexes with host-featured phosphine oxide ligands for monochromic red-light-emitting diodes [J]. Chemistry-A European Journal, 2014, 20(35): 11137-11148.
- [12] Zhou Z Q, Xue J B, Zhang B P, et al. Optical gain based on NaYF₄:Er³⁺, Yb³⁺ nanoparticles-doped polymer waveguide under convenient LED pumping[J]. Applied Physics Letters, 2021, 118(17): 173301.
- [13] 王鉴哲. 长波长发光芳香膦氧稀土配合物结构及性能[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2014: 69-70.
- Wang J Z. Structure and properties of long-wavelength emitting aromatic phosphine oxide rare earth complexes[D]. Harbin: Heilongjiang University, 2014: 69-70.
- [14] 王力磊, 张大明, 廉天航, 等. 基于定向耦合结构的聚合物波导热光模式开关研究[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0704002.
- Wang L L, Zhang D M, Lian T H, et al. Polymeric waveguide thermo-optic switch based on directional coupler[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0704002.
- [15] 黎浩, 崔珍珍, 陈卫清, 等. 稀土掺杂氟化物多波段上转换激光研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(7): 071601.
- Li H, Cui Z Z, Chen W Q, et al. Research progress on rare earth doped fluoride multiband upconversion laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(7): 071601.
- [16] 曲波, 刘奇, 王思博, 等. 对称多通泵浦双层 Yb:YAG 平面波导放大器[J]. 光学学报, 2021, 41(23): 2314001.
- Qu B, Liu Q, Wang S B, et al. Symmetrical multi-pass-pump double-clad Yb:YAG planar waveguide amplifier[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(23): 2314001.
- [17] 李乐良, 张雪琼, 张琦. 离子交换法制备钕镱磷酸盐波导光放大器[J]. 赣南师范大学学报, 2017, 38(3): 35-38.
- Li L L, Zhang X Q, Zhang Q. Erbium ytterbium co-doped phosphate waveguide amplifier based on ion exchange method[J]. Journal of Gannan Normal University, 2017, 38(3): 35-38.
- [18] Zhang L Y, Chen N K, Hu L L. High Er³⁺ concentration low refractive index fluorophosphate glass for evanescent wave optical amplifiers[J]. Physica B: Condensed Matter, 2008, 403(19/20): 3470-3472.
- [19] El-Diasty F, Amichi A. Evanescent-wave in perturbed optical fibers[J]. Optics Communications, 2008, 281(17): 4329-4333.

Optical Properties of Neodymium-Doped Polymer Optical Waveguides Based on Light-Emitting Diode Pumping

Yang Xingchen¹, Zhou Zhaoqin¹, Man Yi², Xu Hui^{2**}, Zhang Dan^{1*}

¹*School of Electronic Science and Engineering (National Model Microelectronics College), Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China;*

²*Key Laboratory of Functional Inorganic Material Chemistry, Ministry of Education, School of Chemistry, Chemical Engineering and Materials, Heilongjiang University, Harbin 150080, Heilongjiang, China*

Abstract

Objective Rare-earth-doped optical waveguide amplifiers (RDWAs) have been widely investigated over the past few years because of their low cost, compensation for optical loss, compatibility with silicon substrates, and potential applications in integrated optical systems. Among the rare-earth elements, neodymium has received significant attention because it can achieve optical amplification at 1.06 μm . 808 nm semiconductor lasers are often selected according to the intrinsic absorption of Nd³⁺ ions from ⁴I_{9/2} state to ⁴F_{5/2} state to achieve the population inversion of Nd³⁺ ions. However, semiconductor lasers with a high pump power (100–400 mW) cause thermal damage to the waveguides and induce the up-conversion parasitic effect. Moreover, it is difficult to reduce their commercial costs. Therefore, three low-cost light-emitting diodes (LEDs) with different central wavelengths are selected as pump sources to achieve optical gains in neodymium-complex-doped polymer waveguides.

Methods Using thermal ion exchange technology, a group of Ag⁺-K⁺ ion-exchanged glass waveguides is fabricated in a BK-7 optical glass. A group of rectangular SU-8 polymer waveguides with a cross-section of 8 μm × 5 μm is fabricated by a one-step lithography process. Next, an active polymer material, neodymium complex Nd(TTA)₃DBTDPO-doped PMMA polymer, is spin-coated as the top cladding on the surfaces of the two types of waveguides. The room-temperature absorption and photoluminescence (PL) spectra of Nd(TTA)₃DBTDPO-doped PMMA polymer films are measured. Under the excitation of three blue-violet LEDs with different central wavelengths, optical gains are achieved in waveguides based on evanescent-wave coupling.

Results and Discussions For the evanescent-wave optical waveguide based on Ag⁺-K⁺ ion-exchanged glass with a length of 10 mm, the output optical intensity increases with the increasing pump power when the input signal power is 0.03 mW at 1.06 μm wavelength [Fig. 5(a)]. For a fixed signal power, the relative gain increases linearly with increasing pump power [Fig. 5(b)]. When the input signal power is 0.03 mW at 1.06 μm and the pump power is 225 mW, the relative gains of 3.6 dB/cm, 2.2 dB/cm, and 0.9 dB/cm are obtained under LED excitation with central wavelengths of 405, 581, and 745 nm, respectively. The relative gain

under the excitation of the 581 nm LED is better than that of the 745 nm LED because of the increased absorption coefficient of Nd^{3+} ions. The organic ligand can realize the transition from a ground state (S_0) to a high-energy singlet state (S_1) by absorbing 405 nm pumped light energy and then transit the energy to a triplet state (T) by intersystem crossing. Moreover, Nd^{3+} ions can be excited from the ground state ${}^4I_{9/2}$ to ${}^4F_{9/2}$ through energy transfer from the organic ligands in the triplet state (T) (Fig. 7). After relaxation to the ${}^4F_{3/2}$ level, the luminescence at 1060 nm (${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$) is achieved. Therefore, the relative gain under the excitation of the 405 nm LED is better than those under the excitations of the 581 nm and 745 nm LEDs. For the neodymium-doped polymer waveguide with a length of 8 mm based on evanescent-wave coupling, the relationship between the output signal intensity and pump power shows the same trend as that for the ion-exchanged optical waveguide (Fig. 6). When the pump power reaches 225 mW, a relative gain of approximately 4.1 dB/cm is obtained. Compared to the ion-exchanged waveguide, which only has a neodymium-doped polymer attached to the upper layer of the waveguide, the three sides of the polymer waveguide are surrounded by neodymium-doped polymer. Thus, the polymer waveguide exhibits an increased amplification ability.

Conclusions In this study, a new LED top-pumping mode based on an evanescent-wave optical waveguide is proposed. The relative gain based on two types of optical waveguides with $\text{Nd}(\text{TTA})_3\text{DBTDPO}$ complex-doped PMMA polymer as the top cladding is demonstrated. An intramolecular energy transfer mechanism from the organic ligands (DBTDPO and TTA) to the central Nd^{3+} ions has been established. Using the vertical top pumping mode of the LED, the up-conversion parasitic effect and waveguide thermal damage caused by traditional laser pumping can be overcome because the incident power of the LED is almost uniformly distributed on the waveguide surface. The neodymium complex $\text{Nd}(\text{TTA})_3\text{DBTDPO}$ -doped PMMA polymer used in this study can be easily spin-coated on various waveguides, such as silicon on insulator (SOI), silicon nitride, polymer, and glass, to realize a loss compensation at 1.06 μm . The vertical top pumping mode of an LED based on intramolecular energy transfer can significantly reduce the commercial cost of the device and has potential market application value.

Key words lasers; waveguide amplifier; neodymium complex; 1.06 μm ; evanescent wave; LED pumping