

## 绝缘体上掺铒铌酸锂放大器建模与实验研究

项君民, 蔡明璐, 吴侃\*, 张广进, 陈建平

上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240

**摘要** 绝缘体上掺铒铌酸锂(Er:LNOI)因其可以提供高增益而备受关注。对Er:LNOI波导放大器完成了建模,并建立了对应的能级速率方程。利用该模型对Er:LNOI波导的增益性能进行了仿真,并与实验进行了对比。当信号波长为1531.5 nm和1550.0 nm时,研究了放大器在980 nm和1484 nm泵浦波长下的净增益,并且通过实验和仿真比较了不同信号功率和泵浦功率下的波导增益。除此之外,还研究了波导长度对放大器增益的影响。

**关键词** 光学器件; 波导; 放大器; 绝缘体上掺铒铌酸锂; 净增益

中图分类号 TN252

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1323002

## Modeling and Experimental Investigation of Erbium-Doped Lithium Niobate on Insulator Amplifiers

Xiang Junmin, Cai Minglu, Wu Kan\*, Zhang Guangjin, Chen Jianping

State Key Lab of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

**Abstract** Erbium-doped lithium niobate on insulator (Er : LNOI) has attracted much attention because of its high gain. The Er : LNOI waveguide amplifier is modeled and the corresponding energy-level rate equation is established. The gain performance of Er : LNOI waveguide is simulated by using the model and compared with experiments. The internal net gains of the amplifier at the signal wavelength of 1531.5 nm and 1550.0 nm are studied at 980 nm and 1484 nm pump wavelengths. The waveguide gains with different signal powers and pump powers are compared by experiment and simulation. In addition, the effect of waveguide length on amplifier gain is also investigated.

**Key words** optical devices; waveguide; amplifier; erbium-doped lithium niobate on insulator; net gain

## 1 引言

近几十年来掺铒器件层出不穷,尤其是掺铒光纤放大器(EDFA)成为当时光通信研究的热点<sup>[1-5]</sup>。与铒相关的集成平台因具有较长的激发态寿命和稳定的光学增益而受到越来越多研究者的关注。无机宿主材料主要有铌酸锂(LN)、氧化物、硅酸盐和磷酸盐等<sup>[6-10]</sup>。Yan等<sup>[6]</sup>在长度为1 cm的掺Er<sup>3+</sup>的磷酸盐玻璃波导中,使用980 nm泵浦波长和65 mW泵浦功率在1535 nm处获得了4.1 dB的净增益。Frankis等<sup>[7]</sup>在掺铒TeO<sub>2</sub>波导上基于1470 nm泵浦实现了5 dB的净增益和1.4 dB/cm的单位波导长度增益。虽然使用这些平台实现的放大器可以提供相对稳定的增益,但是更高的净增益和单位波导长度增益需要综合考虑铒离子浓度、泵浦光强度和信号光强度等。

近年来,绝缘体上掺铒铌酸锂(Er:LNOI)已经在高集成上展现出了卓越的性能,并且可以掺杂浓度较高的Er<sup>3+</sup><sup>[11]</sup>。与其他宿主材料相比,Er:LNOI的发射截面和吸收截面要大得多。此外,由于Er:LNOI具有优异的声光和电光性能,故其已被用于光学调制器<sup>[12]</sup>、激光器<sup>[13]</sup>和声光器件<sup>[14]</sup>中。Zhou等<sup>[15]</sup>制作了一个背景损耗为0.16 dB/cm的集成光波导,并在长度为3.6 cm的波导上实现了18 dB的小信号增益。Chen等<sup>[16]</sup>在长度为5 mm的波导上实现了5 dB的内部净增益,而Luo等<sup>[17]</sup>实现了15 dB的增益。Yan等<sup>[18]</sup>在长度为5.3 mm的Er:LNOI波导上实现了8.3 dB的净增益,相当于15.6 dB/cm的单位波导长度增益。关于Er:LNOI本身的波导性质也逐渐被报道。Zhang等<sup>[19]</sup>研究了Er:LNOI晶体在1530 nm左右波长的发射截面和吸收截面,对掺铒或共掺LNOI的绿色上转换也进

收稿日期: 2021-12-15; 修回日期: 2022-01-10; 录用日期: 2022-01-18

通信作者: \*kanwu@sjtu.edu.cn

行了相应的描述<sup>[20-21]</sup>。Huang 等<sup>[22]</sup>研究了 980 nm 和 1484 nm 泵浦波长下波导放大器在 Er:LNOI 中的相对转化效率。Lazaro 等<sup>[23]</sup>测定了掺铒 Ti:LiNbO<sub>3</sub> 波导中 550 nm 和 860 nm 左右波长的发射截面和吸收截面。

对于掺铒铌酸锂波导来说,虽然已经有很多工作展示了该平台具有高增益和高集成的优越性,但是在波导上通过理论与实践相结合,综合 Er:LNOI 波导本身的特性对各个因素进行控制,从而分析 Er:LNOI 波导放大器的增益性能依然有待研究。

本文对 Er:LNOI 放大器进行了全面的研究,包括理论模型、放大器仿真与实验的对比。通过对 Er<sup>3+</sup> 离子能级模型进行简化,得到了在 980 nm 和 1484 nm 泵浦下的波导放大器模型,从而建立相应的能级速率方程。重点对 1484 nm 泵浦波长和不同信号功率下波导放大器的增益进行了仿真和实验对比。本工作将为今后对 Er:LNOI 波导放大器增益的研究、波导放大器的改进和最佳性能的探索提供参考。

## 2 理论模型

本节主要建立了 Er:LNOI 放大器模型,并且主要

基于三能级放大器模型进行分析。在这个模型中,主要考虑了 4 个典型的过程:基态吸收(GSA)、受激发射(SE)、激发态吸收(ESA)和能量上转换(ETU)。图 1 中描述了典型的 Er<sup>3+</sup> 离子能级和能量转换过程。位于基态 <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> 的电子被 980 nm 泵浦光激发并且通过基态吸收转移到 <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> 能级。接着,<sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> 能级上的一部分电子通过无辐射弛豫到 <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> 能级,最终会转移到基态并放出波长为 1530 nm 的光子。众所周知,位于 <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> 能级上的电子具有较长的荧光寿命,这会导致粒子数反转并且在通信波段附近产生增益。位于 <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> 能级上的电子也有可能继续吸收泵浦光子,通过激发态吸收转移到更高的能级(<sup>4</sup>F<sub>7/2</sub>)上。这些电子也会无辐射弛豫到较低的能级(<sup>4</sup>S<sub>3/2</sub> 和 <sup>4</sup>H<sub>11/2</sub>)上,并且最终会在 530 nm 和 550 nm 波长附近以绿光辐射的形式转移到基态。模型中还考虑了另一种能量上转换的过程,通常也被称为协同上转换(CUC),即:(<sup>4</sup>I<sub>13/2</sub>, <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub>)→(<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>, <sup>4</sup>I<sub>9/2</sub>)和(<sup>4</sup>I<sub>11/2</sub>, <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub>)→(<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>, <sup>4</sup>F<sub>7/2</sub>),对应的能量上转换系数为 C<sub>up1</sub> 和 C<sub>up2</sub>。由于在能级 <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> 上的荧光寿命(微秒级别)比 <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> (毫秒级别)要短得多<sup>[9]</sup>,故在模型中只考虑了 C<sub>up1</sub> 的作用。

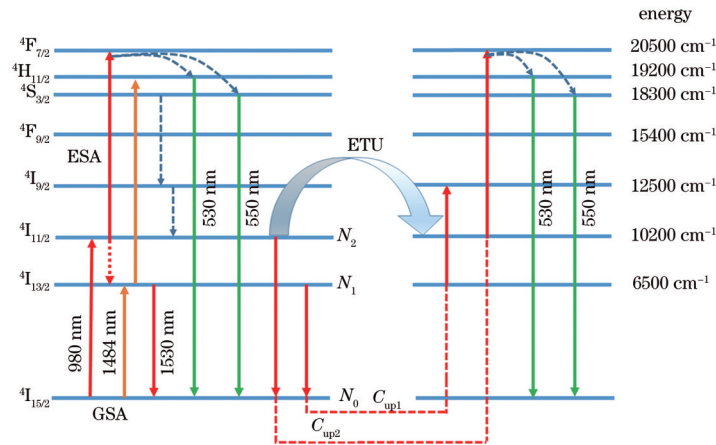


图 1 Er<sup>3+</sup> 能级模型

Fig. 1 Energy level model for Er<sup>3+</sup>

采用稳态三能级模型描述 Er:LNOI 放大器增益的动态特性,该过程<sup>[9]</sup>可以描述为

$$\frac{dN_2}{dt} = R_p + C_{up1}N_1^2 - \frac{1}{\tau_2}N_2 = 0, \quad (1)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = -R_s - 2C_{up1}N_1^2 + \frac{1}{\tau_2}N_2 - \frac{1}{\tau_1}N_1 = 0, \quad (2)$$

$$N_0 + N_1 + N_2 = N_d, \quad (3)$$

$$R_p = \frac{\lambda_p}{hc} P_p [\sigma_{abs}(\lambda_p)N_0 - \sigma_{em}(\lambda_p)N_2], \quad (4)$$

$$R_s = \frac{\lambda_s}{hc} P_s [\sigma_{em}(\lambda_s)N_1 - \sigma_{abs}(\lambda_s)N_0], \quad (5)$$

式中:  $N_0$ 、 $N_1$  和  $N_2$  分别为能级 <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>、<sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> 和 <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> 上的粒子密度;  $N_d$  为 Er<sup>3+</sup> 离子掺杂浓度;  $h$  为普朗克常数;  $c$  为真空中的光速;  $P_p$  为泵浦光功率;  $P_s$  为信号光功率;  $R_p$  为泵浦净受激吸收率;  $R_s$  为信号净受激发射率;  $\lambda_p$  为泵

浦光波长;  $\lambda_s$  为信号光波长;  $\tau_1$  和  $\tau_2$  分别为激发态 <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> 和 <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> 上的荧光寿命。由式(4)和式(5)可知,  $R_p$  和  $R_s$  是由吸收截面  $\sigma_{abs}$ 、发射截面  $\sigma_{em}$  和光子数  $\{[\lambda_{p,s}/(hc)]P_{p,s}\}$  决定的。

沿波导的传播方向,根据 Lambert-Beer 定律可以计算出在较短的波导长度( $\Delta z$ )内泵浦光( $P_p$ )和信号光( $P_s$ )的变化情况,相应表达式<sup>[8]</sup>为

$$P_p(z + \Delta z) = P_p(z) \exp\left\{\left[\sigma_{em}(\lambda_p)N_2(z) - \sigma_{abs}(\lambda_p)N_0(z) - \sigma_{ESA}(\lambda_p)N_2(z) - \alpha_{loss}(\lambda_p)\right]\Delta z\right\}, \quad (6)$$

$$P_s(z + \Delta z) = P_s(z) \exp\left\{\left[\sigma_{em}(\lambda_s)N_2(z) - \sigma_{abs}(\lambda_s)N_0(z) - \alpha_{loss}(\lambda_s)\right]\Delta z\right\}, \quad (7)$$

式中:  $\sigma_{ESA}$  为 ESA 截面;  $\alpha_{loss}$  为波导单位长度的传播损耗;  $z$  为光沿波导传播的距离。在 1530 nm 信号光波长附近,  $\sigma_{ESA}$  的值近似为 0<sup>[24]</sup>。实际上,在 1484 nm 泵浦下

上转换过程发生的情况要比在 980 nm 泵浦下少得多, 进一步假设在  $N_2$  能级上的电子可以大部分无辐射跃迁到  $N_1$  能级上, 这样 1484 nm 泵浦下上转换过程就可以被忽略<sup>[25]</sup>。

波导放大器的内部净增益也可以通过有泵浦和无泵浦条件下的信号光功率( $P_{on}$  和  $P_{off}$ ) 计算出来, 相应的表达式为

$$G_{net} = 10\lg(P_{on}/P_{off}) - \alpha_{abs}L - \alpha_{loss}L, \quad (8)$$

式中:  $\alpha_{abs}$  为波导放大器单位长度的吸收损耗;  $L$  为波导长度。

### 3 仿真与实验研究

使用了高质量的 Z 切 Er:LNOI 晶圆来制作波导,

该晶圆由 600 nm 厚的掺铒铌酸锂薄膜、2  $\mu\text{m}$  厚的  $\text{SiO}_2$  和 0.4 mm 厚的 Si 衬底组成<sup>[26]</sup>。实验中使用的波导长度为 2.58 cm, 铒离子浓度(摩尔分数)为  $0.72 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 。整个实验装置基于双向泵浦方式, 如图 2 所示, 其中 PC 为偏振控制器。双向泵浦兼顾了放大器的输出功率与噪声特性。980 nm 泵浦光或 1484 nm 泵浦光以前向和后向的方式分别注入 Er:LNOI 波导, C 波段可调激光器用于产生信号光。接着, 信号光和泵浦光通过波分复用器(WDM)进入波导, 另一端通过 WDM 过滤出波长为 1531.5 nm 的信号光, 从光谱仪(OSA)中观察被放大的信号功率。

在整个分析过程中, 将实验结果与仿真结果进行了比较。仿真过程中使用到的波导放大器参数如表 1 所示。

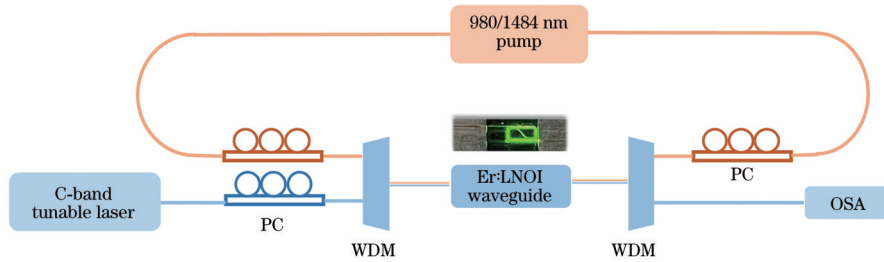


图 2 Er:LNOI 波导增益测试实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of gain measurement for Er:LNOI waveguide

表 1 增益仿真中 Er:LNOI 放大器的参数

Table 1 Parameters of Er:LNOI amplifier in gain simulation

Parameter	Symbol	Value
$\text{Er}^{3+}$ concentration / $\text{cm}^{-3}$	$N_d$	$0.72 \times 10^{20}$
Pump wavelength / nm	$\lambda_p$	980/1484
Signal wavelength / nm	$\lambda_s$	1531.5
Waveguide length / cm	$L$	2.58
$^4\text{I}_{13/2}$ lifetime / ms	$\tau_1$	2.3
Absorption cross section / ( $10^{-20} \text{ cm}^2$ )	$\sigma_{abs}(\lambda_p)$	0.85 or 0.52 <sup>[22]</sup>
	$\sigma_{abs}(\lambda_s)$	1.04
Emission cross section / ( $10^{-20} \text{ cm}^2$ )	$\sigma_{em}(\lambda_p)$	0 or 0.16 <sup>[22]</sup>
	$\sigma_{em}(\lambda_s)$	1.01
ESA cross section / ( $10^{-22} \text{ cm}^2$ )	$\sigma_{ESA}(\lambda_p)$	$1.0^{[25]}$
CUC parameter / ( $10^{-18} \text{ cm}^2$ )	$C_{up}$	$1.0^{[25]}$
Absorption loss / ( $\text{dB} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	$\alpha_{abs}$	1.78
Background propagation loss / ( $\text{dB} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	$\alpha_{loss}(\lambda_p)$	2.5

对掺铒铌酸锂薄膜进行了实验表征, 并提取出表 1 中参数的值。从 X 射线光电子能谱仪(XPS)图谱中得到铒离子浓度<sup>[26]</sup>。将 1.5  $\mu\text{m}$  波长附近的荧光光谱和荧光寿命与 McCumber 公式<sup>[27]</sup>相结合可得到信号波长处的发射截面和吸收截面, 测试方法可参见文献[19]。吸收损耗和背景损耗的测试方法在文献[26]中进行了具体阐述。

980 nm 泵浦光 and 不同波长的信号光通过波导产生的增益如图 3 所示。其中, 信号光的功率为 -50 dBm。

当信号波长为 1531.5 nm, 泵浦功率约为 4 mW 时, 波导放大器的内部净增益逐渐超过 0 dB。当泵浦功率为 15 mW 时, 波导的净增益可以达到 8.8 dB。从图 3 中可以看出, 在相同泵浦功率下使用 1550.0 nm 波长信号光时的波导放大器的增益要小于 1531.5 nm 信号波长对应的增益。实际上, 当泵浦功率达到 20 mW 时, 1550.0 nm 信号波长所能产生的最大净增益依然小于 0 dB。上述现象是由 Er:LNOI 波导发射截面的差异造成的, 在 1531.5 nm 波长处的发射截面要大于 1550.0 nm 波长处的发射截面。可通过额外掺杂等方式对材料的发射截面进行优化, 提升 1550.0 nm 波长处的增益。

由于 1484 nm 泵浦光与 1.53  $\mu\text{m}$  波长信号光有

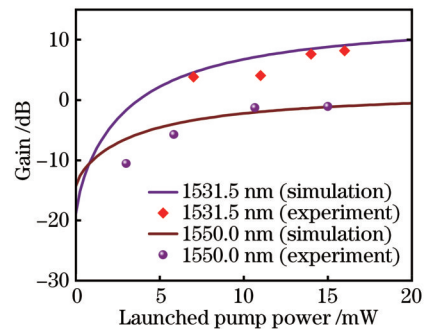


图 3 980 nm 泵浦下波导放大器增益的仿真和实验对比图

Fig. 3 Comparison of waveguide amplifier gain between simulation and experiment with 980 nm pump

更好的模场匹配,且 1484 nm 泵浦中激发态吸收过程可被忽略<sup>[25]</sup>,因此在该泵浦波长下波导放大器的净增益要高于相同条件下 980 nm 泵浦的净增益。此外,1484 nm 泵浦光下波导放大器的模型可以被简化为准二能级模型。对 1484 nm 泵浦下信号增益进行了较为详细的讨论分析。图 4(a)展示了在信号功率为 -50 dBm、泵浦波长为 1484 nm 条件下对应的波导放大器净增益仿真和实验对比图。

泵浦功率为 15 mW 时波导放大器净增益可以达到大约 14.5 dB,这比相同条件下 980 nm 泵浦光的净增益高 5.7 dB。实验和仿真结果表明,当泵浦功率约为 20 mW 时,1531.5 nm 信号波长的增益比 1550.0 nm 信号波长的增益高 13.2 dB,这也是波导发射截面不同引起的。然而,在较低的泵浦功率范围内,

1531.5 nm 波长的信号增益较小,因为此时  $\text{Er}^{3+}$  中的粒子没有完全转化为信号光,波导增益主要受吸收损耗影响。当泵浦功率继续增大时,波导放大器的净增益逐渐趋于饱和。由于仿真模型与实际波导间存在差异,故仿真结果与波导测试结果之间的最大增益差约为 3 dB。图 4(b)展示了当信号光功率为 0 dBm 时,在 1531.5 nm 和 1550 nm 波长下波导放大器的净增益。当泵浦光功率为 20 mW,信号波长为 1531.5 nm 时,-50 dBm 信号功率与 0 dBm 信号功率产生的信号增益差约为 18 dB,而使用 1550.0 nm 信号波长时在相同泵浦条件下大信号与小信号产生的净增益相差不超过 8 dB。这是因为在较大的信号功率情况下,有限的粒子数反转不足以提供足够的增益,高浓度掺杂中的淬灭效应也一定程度上限制了大信号增益。

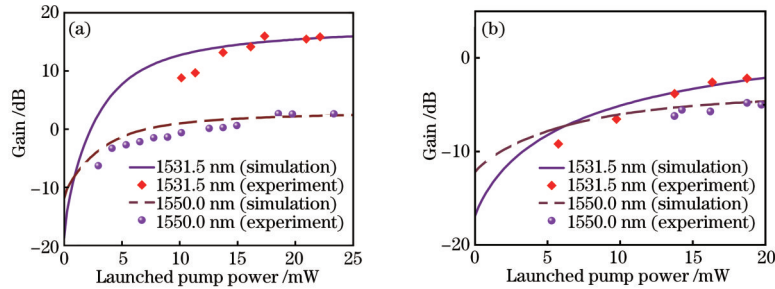


图 4 1484 nm 泵浦下波导放大器增益的仿真和实验对比图。(a)信号功率为 -50 dBm;(b)信号功率为 0 dBm

Fig. 4 Comparison of waveguide amplifier gain between simulation and experiment with 1484 nm pump. (a) -50 dBm signal power; (b) 0 dBm signal power

此外,还研究了波导长度对净增益的影响。图 5(a)给出了 2.8 cm 波导放大器净增益受信号光功率影响的变化情况。描述了信号波长为 1531.5 nm、泵浦波长为 1484 nm 波导放大器的增益性能。与 2.58 cm 波导长度净增益的变化趋势相同,当泵浦光强为 15 mW、信号光功率为 -30 dBm 时,放大器净增益为 6.34 dB,当信号光功率增加到 0 dBm 时,净增益减小到 -2.9 dB。图 5(b)比较了不同波导长度下使用 1550.0 nm 信号光波长和 -50 dBm 信号光功率的波导放大器净增益情况。

可以看出,当泵浦功率低于 5.75 mW 时,1.62 cm 波导长度的波导放大器的净增益略高于 2.58 cm 波导长度的情况,这是因为当泵浦功率较小时,波导放大器的增益主要受波导损耗的影响,而长度越长的波导引起的波导损耗越大。随着泵浦功率的增加,在一定范围内波导长度越长,波导放大器净增益越大。实际上,当波导长度增加到一定的值之后,放大器的增益会逐渐转化为损耗,此时波导的净增益主要受到  $\text{Er}^{3+}$  浓度的影响。

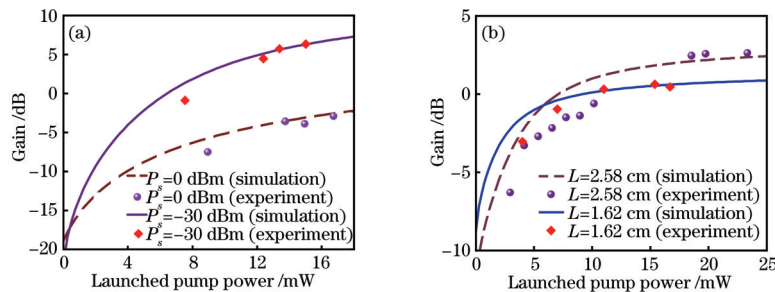


图 5 不同波导长度下波导放大器增益的仿真和实验对比图。(a) 1531.5 nm 信号波长下波导长度为 2.8 cm 的波导放大器的内部净增益;(b) 1484 nm 泵浦波长下波导长度为 2.58 cm 和 1.62 cm 的波导放大器的内部净增益对比

Fig. 5 Comparison of waveguide amplifier gain between simulation and experiment at different waveguide lengths. (a) Internal net gain of waveguide amplifier with waveguide length of 2.8 cm under 1531.5 nm signal wavelength; (b) comparison of internal net gains between waveguide amplifiers with waveguide lengths of 2.58 cm and 1.62 cm under 1484 nm pump wavelength

## 4 结 论

对 Er:LNOI 波导放大器进行了建模,并建立了能级速率方程。基于建立的模型在 980 nm 和 1484 nm 泵浦光下对波导放大器增益进行了仿真和实验研究。由于 1484 nm 泵浦光与信号光的模场相近且具有更少的激发态吸收,故在 15 mW 左右的泵浦光功率和 -50 dBm 信号光功率下,1484 nm 波长泵浦光在 1531.5 nm 信号波长处提供的放大器增益要比相同条件下 980 nm 提供的增益高约 5.7 dB。由于 1531.5 nm 波长处的发射截面大于 1550.0 nm 波长处的截面,故 1531.5 nm 波长下的波导放大器可以提供更高的增益。波导放大器在较小的信号输入功率情况下产生的净增益要高于较大的信号输入功率情况。此外,在一定的 Er<sup>3+</sup> 离子浓度情况下,波导放大器净增益会随着波导长度在一定范围内的增加而增加。

### 参 考 文 献

- [1] Sobon G, Kaczmarek P, Antonczak A, et al. Controlling the 1  $\mu\text{m}$  spontaneous emission in Er/Yb co-doped fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2011, 19(20): 19104-19113.
- [2] Htein L, Fan W W, Watekar P R, et al. Amplification by white light-emitting diode pumping of large-core Er-doped fiber with 12 dB gain[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(23): 4853-4855.
- [3] Tu H, Xi L X, Zhang X G, et al. Analysis of the performance of optical frequency comb based on recirculating frequency shifter influenced by an Er-doped fiber amplifier[J]. *Photonics Research*, 2013, 1(2): 88-91.
- [4] le Gouët J, Oudin J, Perrault P, et al. On the effect of low temperatures on the maximum output power of a coherent erbium-doped fiber amplifier[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(14): 3611-3619.
- [5] Yu W L, Yan P, Xiao Q R, et al. Power scalability of a continuous-wave high-power Er-Yb co-doped fiber amplifier pumped by Yb-doped fiber lasers[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(7): 2046-2055.
- [6] Yan Y C, Faber A J, de Waal H, et al. Net optical gain at 1.53  $\mu\text{m}$  in an Er-doped phosphate glass waveguide on silicon[C]//*Optical Amplifiers and Their Applications*, July 21, 1997, Victoria, Canada. Washington, D. C.: OSA, 1997: FAW8.
- [7] Frankis H C, Mbonde H M, Bonneville D B, et al. Erbium-doped TeO<sub>2</sub>-coated Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> waveguide amplifiers with 5 dB net gain[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(2): 127-134.
- [8] Bradley J D B, Pollnau M. Erbium-doped integrated waveguide amplifiers and lasers[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2011, 5(3): 368-403.
- [9] Vázquez-Córdova S A, Dijkstra M, Bernhardt E H, et al. Erbium-doped spiral amplifiers with 20 dB of net gain on silicon[J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 25993-26004.
- [10] Salas-Montiel R, Solmaz M E, Eknoyan O, et al. Er-doped optical waveguide amplifiers in X-cut lithium niobate by selective codiffusion[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(6): 362-364.
- [11] Jiang X D, Pak D, Nandi A, et al. Rare earth-implanted lithium niobate: properties and on-chip integration[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115(7): 071104.
- [12] Xu M Y, He M B, Zhang H G, et al. High-performance coherent optical modulators based on thin-film lithium niobate platform[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 3911.
- [13] Xiao Z Y, Wu K, Cai M L, et al. Single-frequency integrated laser on erbium-doped lithium niobate on insulator[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(17): 4128-4131.
- [14] Cai L T, Mahmoud A, Khan M, et al. Acousto-optical modulation of thin film lithium niobate waveguide devices [J]. *Photonics Research*, 2019, 7(9): 1003-1013.
- [15] Zhou J X, Liang Y T, Liu Z X, et al. On-chip integrated waveguide amplifiers on erbium-doped thin-film lithium niobate on insulator[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15(8): 2100030.
- [16] Chen Z X, Xu Q, Zhang K, et al. Efficient erbium-doped thin-film lithium niobate waveguide amplifiers[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(5): 1161-1164.
- [17] Luo Q, Yang C, Hao Z Z, et al. On-chip erbium-doped lithium niobate waveguide amplifiers[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(6): 060008.
- [18] Yan X S, Liu Y A, Wu J W, et al. Integrated spiral waveguide amplifiers on erbium-doped thin-film lithium niobate[EB/OL]. (2021-05-01) [2021-06-02]. <https://arxiv.org/abs/2105.00214>.
- [19] Zhang D L, Sun W B, Wong W H, et al. Emission and absorption cross sections of Er<sup>3+</sup>: LiNbO<sub>3</sub> crystal: composition effect[J]. *Optical Materials Express*, 2015, 5(9): 1920-1926.
- [20] Ohtsuki T, Honkanen S, Najafi S I, et al. Cooperative upconversion effects on the performance of Er<sup>3+</sup>-doped phosphate glass waveguide amplifiers[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1997, 14(7): 1838-1845.
- [21] Lü J M, Hao X T, Chen F. Green up-conversion and near-infrared luminescence of femtosecond-laser-written waveguides in Er<sup>3+</sup>, MgO co-doped nearly stoichiometric LiNbO<sub>3</sub> crystal[J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): 25482-25490.
- [22] Huang C H, McCaughan L. 980-nm-pumped Er-doped LiNbO<sub>3</sub> waveguide amplifiers: a comparison with 1484-nm pumping[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1996, 2(2): 367-372.
- [23] Lazaro J A, Valles J A, Rebolledo M A. *In situ* measurement of absorption and emission cross sections in Er<sup>3+</sup>-doped waveguides for transitions involving thermalized states[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1999, 35(5): 827-831.
- [24] Agazzi L, Wörhoff K, Kahn A, et al. Spectroscopy of upper energy levels in an Er<sup>3+</sup>-doped amorphous oxide[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2013, 30(3): 663-677.
- [25] Veasey D L, Gary J M, Amin J, et al. Time-dependent

- modeling of erbium-doped waveguide lasers in lithium niobate pumped at 980 and 1480 nm[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1997, 33(10): 1647-1662.
- [26] Cai M L, Wu K, Xiang J M, et al. Erbium-doped lithium niobate thin film waveguide amplifier with 16 dB internal net gain[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2022, 28(3): 8200608.
- [27] McCumber D E. Einstein relations connecting broadband emission and absorption spectra[J]. Physical Review, 1964, 136(4A): A954-A957.