

镱铒共掺 Al_2O_3 光波导放大器的净增益特性*

李成仁^{1,2,3} 李淑凤¹ 宋琦¹ 李建勇¹ 宋昌烈¹ 雷明凯³

(1 大连理工大学物理系, 大连 116024)

(2 辽宁师范大学物理系, 大连 116029)

(3 大连理工大学材料科学与工程学院, 大连 116024)

摘 要 将中频磁控溅射方法沉积制备的镱铒共掺 Al_2O_3 薄膜刻蚀成矩形截面、直线通道的光波导放大器. 测量了净增益与抽运功率的关系, 结果表明: 净增益随抽运功率近似线性增加, 阈值抽运功率为 18 mW; 抽运功率为 68 mW 时, 长 2.24 cm 的光波导放大器净增益为 8.44 dB. 数值模拟结果显示, 相同抽运功率下的净增益为 10.6 dB.

关键词 镱铒共掺光波导放大器; 薄膜制备; 净增益; 数值模拟

中图分类号 TN256 **文献标识码** A

0 引言

1996 年, Hoven 等人制作了 4cm 长的掺铒 Al_2O_3 光波导放大器, 获得 2.3 dB 的净增益^[1], 掀起掺铒光波导放大器 (Erbium-Doped Waveguide Amplifier, 简称 EDWA) 的研究高潮. 人们在掺铒薄膜制备工艺^[2~4]、基质材料选择^[5,6]、敏化元素作用^[7,8]、铒发光机理研究^[9,10]、光波导放大器优化设计^[11~13]和级联特性^[14,15]等方面进行了大量的探索. 虽然国外一些公司 (如法国 Teem 光子公司、美国 Northstar 光子公司等) 已陆续推出了商用化掺铒光波导放大器产品, 增益在 10 dB~20 dB 之间, 但这些产品的基质多为各种酸盐玻璃材料, 如磷酸盐玻璃、氟酸盐玻璃, 再利用离子交换方法、磁控溅射方法等工艺将稀土元素铒掺入^[16,17]. 由于稀土元素铒的一些显著特点, 将其作为敏化元素, 能够很好地改善掺铒光波导放大器的性能^[18,19]. 可以预见, 镱铒共掺光波导放大器 (Ytterbium and Erbium Co-Doped Waveguide Amplifiers, 简称 YECDWA) 更具有发展潜力. 本文中, 利用中频磁控溅射方法沉积制备了镱铒共掺 Al_2O_3 薄膜, 并刻蚀成矩形截面、长 2.24 cm 直线通道的镱铒共掺 Al_2O_3 光波导放大器. 在 980 nm 半导体激光器、68 mW 的功率抽运下, 获得了 8.44 dB 的净增益. 测量了净增益与抽运功率的关系, 并与数值模拟结果进行了比较.

1 镱铒共掺 Al_2O_3 薄膜制备

由于安置两个在交变电源 (40 kHz) 驱动下轮

流工作的孪生靶^[20], 所以利用中频磁控溅射沉积薄膜工艺时不仅沉积速率较高, 也保证了沉积系统的工作稳定性, 使所制备的薄膜掺杂均匀、致密、晶格缺陷少、表面粗糙度小. 考虑到: 1) Al_2O_3 、 Er_2O_3 和 Yb_2O_3 有着相似的晶体结构, 允许掺杂高浓度的铒离子和镱离子, 在微小面积内光波导放大器即可获得高的光信号增益; 2) Al_2O_3 折射率较高 (1.62~1.70), 使光波导芯层与缓冲层 (SiO_2) 和覆盖层 (SiO_2 或空气) 之间的折射率反差较大, 抽运光和信号光能很好地被约束在导波层中; 3) 光学损耗低, 0.35 dB/cm; 4) 物理、化学性能稳定. 因此, 选用 Al_2O_3 作为镱铒共掺光波导的基质材料.

但是, 铒离子对 980 nm 波长的吸收截面较小, 而且掺杂高浓度的三价铒离子, 将产生合作上转换、激发态吸收等效应^[21~23], 影响光致发光强度的提高. 镱对 980 nm 波长光的吸收截面近似为铒的八倍. 同时, 镱离子 $^2F_{7/2} \rightarrow ^2F_{5/2}$ 能级差与铒离子 $^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ 能级差近似相等. 在镱铒共掺系统中, 镱吸收大部分抽运功率, 通过能量共振转移, 将抽运能量从镱离子转移到铒离子, 为三价铒离子提供了一种间接的、高效的抽运方式. 此外, 镱本身的浓度猝灭效应很弱, 容易实现高浓度掺杂, 很好地抑制铒离子团簇的形成, 减少铒浓度猝灭现象. 所以, 用镱作为掺铒光波导放大器的敏化剂, 不仅可以增强铒的光致发光强度, 而且极大地改善了铒离子的光致发光特性.

图 1 中, 谱线 b 为中频磁控溅射沉积工艺制备的镱铒共掺 Al_2O_3 薄膜 (掺铒浓度为 1.0 at. %、掺镱浓度为 9.0 at. %), 在 1.0 W 抽运功率下的光致发光光谱. 峰值波长为 1.536 μm 、半值宽度为 46 nm; 谱线 a 是相同工艺参量沉积的、仅掺铒 Al_2O_3 薄膜的光致发光光谱 (光致发光强度已乘 3 倍). 峰值波长为 1.534 μm 、半值宽度为 47 nm. 两种薄膜的掺

* 国家自然科学基金 (批准号: 60477023, 60478035)、辽宁省科学技术厅 (批准号: 20022110) 和辽宁省教育厅 (批准号: 202123198) 基金资助项目
Tel: 0411-84259566 Email: lshdg@sina.com.cn
收稿日期: 2005-04-20

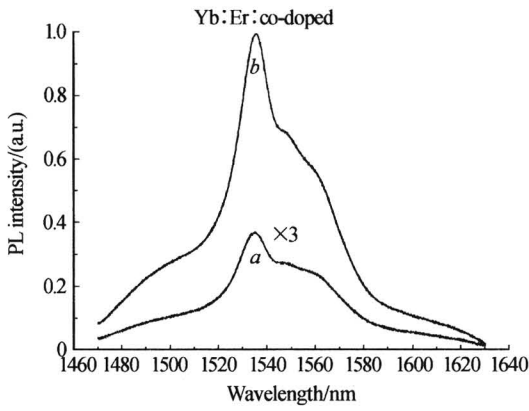


图1 镱铒共掺/掺铒 Al₂O₃ 薄膜光致发光谱比较
 Fig.1 PL spectra of Er-doped and Yb : Er co-doped films
 铒浓度同为 1.0at. % ,但在相同抽运功率下,镱铒共掺 Al₂O₃ 薄膜的光致发光强度,是仅掺铒 Al₂O₃

薄膜的 8.6 倍. 进一步的实验数据也表明,镱铒的最佳掺杂浓度比为 9 : 1.

2 光波导放大器的刻蚀

选用的镱铒共掺 Al₂O₃ 薄膜的参量为:沉积厚度 1.16 μm,掺铒浓度 0.6at. %,掺镱浓度 5.2at. %,退火温度 850 °C,折射率为 1.658;缓冲层 SiO₂ 厚度为 1.2 μm,基底硅厚度为 0.5 mm;膜片面积为 22.4 mm × 10.6 mm.

镱铒共掺 Al₂O₃ 光波导放大器的刻蚀参量为:导波芯层截面尺寸为 10 μm × 1.04 μm;波导间是空气隔离层,宽度为 30 μm;直线沟道长为 22.4 mm,如图 2(a)、(b). 图 2(c)是实际所刻蚀的镱铒共掺光波导放大器的局部放大图.

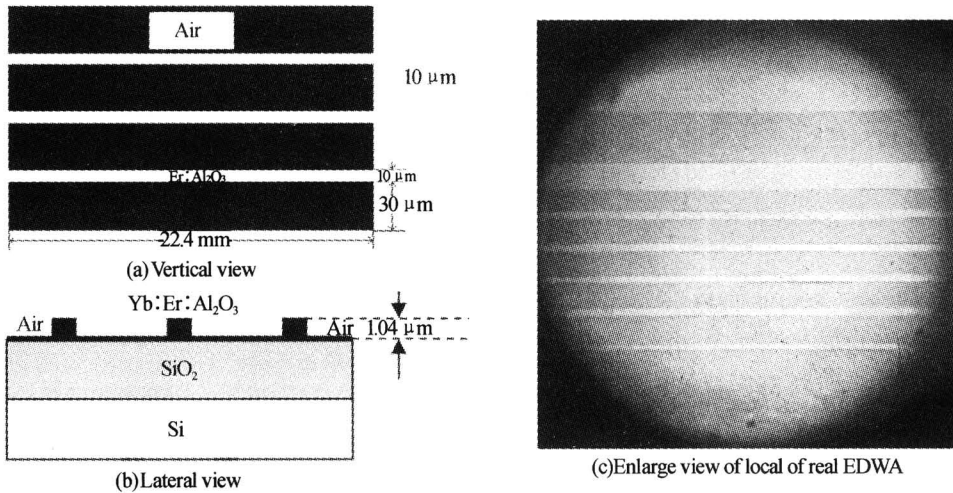


图2 镱铒共掺 Al₂O₃ 光波导放大器结构
 Fig.2 Structure drawing of Yb : Er co-doped Al₂O₃ waveguide amplifier

3 增益测量

首先测量镱铒共掺 Al₂O₃ 光波导放大器的吸收谱. 如图 3,谱线 a 是未经吸收的 LED 原始发射谱. 谱线 b 是零抽运时光波导的吸收谱. 谱线 b 在波长 1.54 μm 处下凹说明信号光已穿越条形沟道,

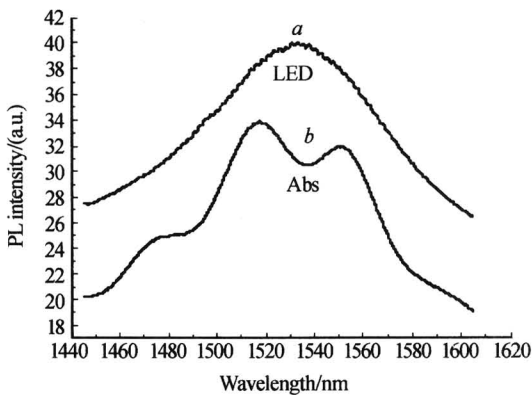


图3 铒镱共掺光波导放大器的吸收谱
 Fig.3 Absorption spectrum of EYCDWA

并出现明显的吸收峰.

对吸收谱线 b 的面积比例法数据处理可得到定量的吸收强度,即零抽运下的吸收增益

$$G_0 = -0.46 \text{ dB}$$

镱铒共掺 Al₂O₃ 光波导放大器的增益测量采用如下系统:抽运源为带尾纤的半导体激光器,输出波长为 980 nm、额定输出功率为 160 mW,其电源为直流工作形式. 信号源为带尾纤的半导体二极管(LED),输出中心波长为 1530 nm、额定输出功率为 10 μW. LED 驱动电源既可以工作在直流状态,也可以被调制成正弦的交流形式工作. 抽运光和信号光经由波分复用器(WDM)合路后,由一根单模光纤输出,抽运功率下降到 149 mW. WDM 输出光纤的末端被腐蚀成 Φ0.96 μm 的锥形光纤尖,此时输出的抽运功率为 112 mW. 在五维精密调节架辅助下,光纤尖与放大器厚 1.04 μm 的导波芯层直接耦合. 被放大的光信号经光学斩波器(425 Hz)和中心波长为 1.54 μm、带宽为 26 nm 的光学带通滤波

器后,入射到半导体致冷的 InGaAs 近红外探测器. 探测器输出的电信号由锁相放大器放大,并由计算机进行数据处理和波形显示. 测量在室温下进行.

待测的光信号系列如图 4. 其中, P_{LED} 是信号源 LED 的输出功率(峰-峰值,下同); P_{in} 是 P_{LED} 耦合进入到光波导内部的输入信号功率; P_{00} 是抽运功率为

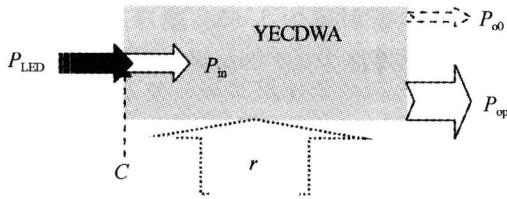


图 4 镱铒共掺光波导放大器的输入和输出信号

Fig. 4 Input signal and output signal of YECDWA

零时,光波导的输出功率; P_{op} 是在一定抽运功率下,光波导的输出信号功率. 各信号间的关系为

$$10 \lg(P_{LED}/P_{in}) = C \quad (1)$$

$$10 \lg(P_{00}/P_{in}) = G_0 - rL \quad (2)$$

$$10 \lg(P_{op}/P_{in}) = NG \quad (3)$$

式(1)~(3)中, C 为光纤与光波导的耦合损耗, r 为单位长度的光波导损耗(含材料损耗和散射等损耗, 0.35 dB/cm), L 为光波导长度(cm), NG 是在一定抽运功率下,光波导放大器的净增益.

从计算机内数据中读出: $P_{LED} = 68$, (图 5 中波形 a , 任意单位, 下同). 在 68 mW 功率抽运下, $P_{op} = 286$ (波形 b). 同时可测得 $P_{00} = 31$, $L = 2.24 \text{ cm}$, 由吸收谱计算得到 $G_0 = -0.46 \text{ dB}$.

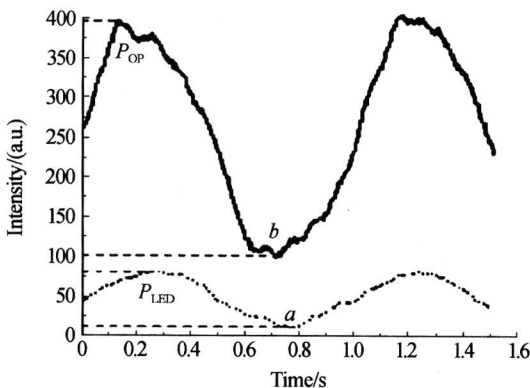


图 5 YECDWA 的输入、输出波形

Fig. 5 Waveform of input/output of YECDWA

依式(2)计算得到 $P_{in} = 41$; 式(1)计算得到 $C = 2.2 \text{ dB}$; 式(3)计算得到 $NG = 8.44 \text{ dB}$, 光波导放大器单位长度的净增益为 3.77 dB/cm .

从图 5 中还可以看到: 信号光由光波导放大器放大后, 输出谱线强度的最低值不为零(幅度约为 100), 这是由于铒离子放大的自发辐射原因所致. 对光波导放大器件的应用而言, 放大的自发辐射属于直流噪音, 将影响信号调制深度的进一步提高, 使

放大系统的抗干扰能力下降. 但可以通过光波导截面几何参量、镱铒掺杂比率等变量优化选择, 可以减小放大的自发辐射的影响. 对测量数据进一步分析可以计算出放大器的交流噪音为 0.072 dB .

不同抽运功率时, 净增益变化的测量数据如图 6 中曲线 a . 净增益随抽运功率增强近似线性增加, 阈值抽运功率为 18 mW . 图 6 中曲线 b 是在上述薄膜参数和刻蚀参量下, 镱铒共掺 Al_2O_3 光波导放大器净增益与抽运功率关系的数值模拟曲线. 计算中, 首先用有限元法解析矩形截面内镱铒共掺 Al_2O_3 导波层内的电磁场分布, 再结合铒离子两个能级 ($^2F_{7/2}$, $^2F_{5/2}$) 和铒离子四个能级 ($^4I_{15/2}$, $^4I_{13/2}$, $^4I_{11/2}$, $^4I_{9/2}$) 及其相互耦合的速率方程、 $1.53 \mu\text{m}$ 信号光和 $0.98 \mu\text{m}$ 抽运光的传输方程, 进行数值模拟计算.

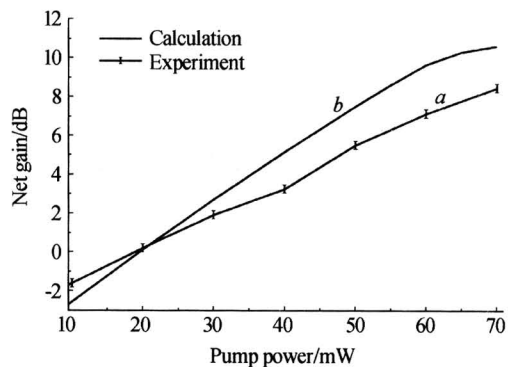


图 6 放大器净增益与抽运功率的关系曲线

Fig. 6 Net gain of YECDWA vs. pump power

从图 6 中可以看到, 实验测量数据与数值计算结果的总体趋势一致. 但数值模拟的 2.24 cm 长、矩形截面的镱铒共掺 Al_2O_3 光波导放大器的净增益为 10.6 dB , 单位长度的净增益为 4.73 dB/cm , 大于实验的实际测量值 3.77 dB/cm . 同时, 理论计算的阈值抽运功率 19 mW 也略大于实验测量值 18 mW . 存在差异的可能原因在于: 1) 计算中所用的几何尺寸为理想刻蚀的截面结构, 而实际刻蚀的截面在一定程度上存在着侧蚀等偏差, 对光波导放大器的净增益特性有一定的影响^[24]; 2) 薄膜表面形貌并非理想化的光滑, 也加重高阶模式在 SiO_2 缓冲层和空气包层中的泄漏, 导致光波导芯层内的抽运功率密度下降.

图 7 是同一样品, 以抽运功率为参变量计算的放大器净增益与波导长度的关系曲线. 从图中可以看到, 抽运功率小于 60 mW 时, 模拟计算的光波导放大器的最佳长度均小于实验样品的实际长度 2.24 cm . 因此, 抽运功率小于 60 mW 时, 净增益已从最高值开始下降.

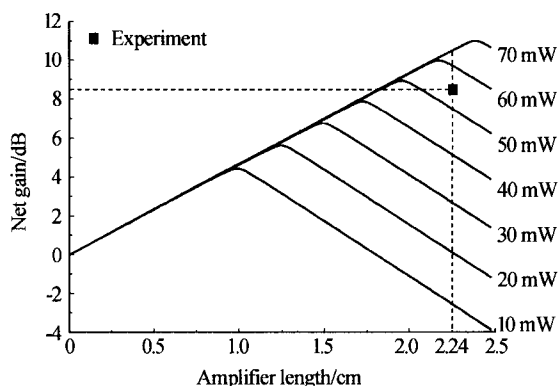


图 7 放大器增益与波导长度的关系曲线

Fig. 7 Net gain of YECDWA vs. length

鉴于刻蚀加工技术的局限性, 现有实验样品的波导参量还未达到优化设计指标. 由于截面宽度较大, 不仅严重地降低了抽运光的功率密度, 也影响了信号光的模式分布. 改矩形截面为脊形截面, 并减小截面面积以提高抽运效率, 将不难使光波导放大器的净增益有明显地提高. 由于钕离子发射截面对波长不是平坦响应, 导致模拟计算结果表明净增益曲线随波长的变化也不平坦. 实验测量显示半值宽度为 62 nm, 3 dB 带宽为 37 nm. 为更好地使全光通信中的多信道信号能同时得到近似相等的净增益放大, 需在光波导放大器后面集成一个增益均衡器单元. 这项工作的理论分析和设计已基本完成, 将另文发表.

4 结论

本文介绍了中频磁控溅射沉积方法制备的镱钕共掺 Al_2O_3 薄膜的光致发光特性, 讨论了敏化剂镱对光致发光强度的影响. 制备工艺相同、掺钕浓度一致和抽运功率相等情况下, 镱钕共掺 Al_2O_3 薄膜的光致发光强度, 是仅掺钕 Al_2O_3 薄膜的 8.6 倍. 给出了气体刻蚀制作的矩形截面、直线通道镱钕共掺 Al_2O_3 光波导放大器的几何参量和性能测试数据. 在 980 nm、68 mW 半导体激光器抽运时, 长 2.24 cm 镱钕共掺 Al_2O_3 光波导放大器的总净增益为 8.44 dB、单位长度净增益为 3.77 dB/cm, 噪音为 0.072 dB. 净增益随抽运抽运功率增加近似线性增长, 阈值抽运功率为 18 mW, 实验数据与数值模拟结果基本吻合, 对两者差异进行了分析.

致谢: 感谢大连理工大学三束材料改性国家重点实验室的李国卿教授在薄膜制备方面给予真诚帮助. 感谢北京创威纳公司韩阶平教授、林红老师在光波导放大器刻蚀方面提供的热情帮助.

参考文献

1 Van den Hoven G N, Koper R J I M, Polman A. Net optical gain at 1.53 μm in Er-doped Al_2O_3 waveguides on

silicon. *Appl Phys Lett*, 1996, **68**(14): 1886~1888

- Slooff L H, Van Blaaderen A, Polman A, et al. Rare-earth doped polymers for planar optical amplifiers. *J Appl Phys*, 2002, **91**(7): 3955~3980
- 王兴军, 曹宝胜, 雷明凯. sol-gel 法制备 Er^{3+} - Yb^{3+} 共掺杂 Al_2O_3 粉末光致发光特性. *光子学报*, 2004, **33**(8): 935~938
Wang X J, Cao B S, Lei M K. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 935~938
- Li C R, Song C L, Li S F, et al. Deposition of Er : Al_2O_3 films and photoluminescence characteristics. *Chinese Physics Letters*, 2003, **20**(9): 1613~1615
- Kenyon A J. Recent developments in rare-earth doped materials for optoelectronics. *Progress in Quantum Electronics*, 2002, **26**(2): 225~284
- Xiang O, Zhou Y, Ooi B S, et al. Optical properties of Er-doped SiO_2 - GeO_2 - Al_2O_3 planar waveguide fabricated by sol-gel process. *Thin Solid Film*, 2000, **370**(2): 243~247
- Strohhöfer C, Polman A. Silver as a sensitizer for erbium. *Appl Phys Lett*, 2002, **81**(8): 1414~1416
- Strohhöfer C, Polman A. Absorption and emission spectroscopy in Er^{3+} - Yb^{3+} doped aluminum oxide waveguides. *Optical Material*, 2003, **21**(6): 705~712
- Seo S T, Shin J H. Exciton - erbium coupling and the excitation dynamics of Er^{3+} in erbium-doped silicon-rich silicon oxide. *Appl Phys Lett*, 2001, **78**(18): 2709~2711
- 雷红兵, 杨沁清, 欧海燕, 等. 掺钕硅光致发光激子传递能量机制. *半导体学报*, 1999, **21**(3): 232~238
Lei H B, Yang Q Q, Ou H Y, et al. *Chinese Journal of Semiconductor*, 1999, **21**(3): 232~238
- 徐静, 戴道铎, 何赛灵. 基于 PML 边界的有限差分法及其在光波导泄露损耗计算中的应用. *光子学报*, 2003, **32**(12): 1426~1429
Xu J, Dai D X, He S L. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(12): 1426~1429
- Pasquale F D, Zoboli M. Analysis of erbium-doped waveguide amplifiers by a full-vectorial finite-element method. *J Lightwave Technol*, 1993, **11**(10): 1565~1573
- 李成仁, 宋昌烈, 李淑凤, 等. 跃掺杂 Er : Al_2O_3 光波导放大器增益特性数值模拟. *光子学报*, 2006, **35**(2): 192~196
Li C R, Song C L, Li S F, et al. *Acta Photonics Sinica*, 2006, **35**(2): 192~196
- 李成仁, 宋昌烈, 饶文雄, 等. 两片掺钕玻璃样品级联荧光光谱的实验研究. *物理学报*, 2003, **52**(3): 751~755
Li C R, Song C L, Li S F, et al. *Acta Phys Sin*, 2003, **52**(3): 751~755
- Li C R, Song L, Li S F, et al. Experimental investigation of photoluminescence spectra of Yb^{3+} sensitized Er^{3+} -doped glass samples in series. *Chin Opt Lett*, 2003, **1**

- (11):664~667
- 16 陈海燕,刘永智,戴基智,等. Er^{3+} - Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃 (LGS-L) 波导放大器设计. 光学学报, 2003, **23**(6): 697~701
Ch H Y, Liu Y Z, Dai J Z, *et al.* *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(6): 697~701
- 17 Righini G C, Brenci M, Forastiere M A, *et al.* Rare-earth-doped glasses and ion-changed integrated optical amplifiers and lasers. *Philosophical Magazine B*, 2002, **82**(6): 721~734
- 18 高景生,宋昌烈,李成仁,等. 中频溅射技术沉积镱钕共掺 Al_2O_3 薄膜光致发光特性. 光电子·激光, 2004, **15**(10): 1162~1165
Gao J S, Song C L, Li C R, *et al.* *J Optoelectro Laser*, 2004, **15**(10): 1162~1165
- 19 李成仁,宋昌烈,李淑凤,等. 掺钕 Al_2O_3 薄膜、镱钕共掺 Al_2O_3 薄膜光致发光特性比较. 半导体光电, 2005, **26**(3): 57~62
Li C R, Song C L, Li S F, *et al.* *Semiconductor Optoelectronics*, 2005, **26**(3): 57~62
- 20 Belkind A, Zhao Z. Dual-anode magnetron sputtering. *Surface and Coating Technology*, 2003, **163-164**: 695~702
- 21 Van den Hoven G N, Snoeks E, Polman A, *et al.* Upconversion in Er-implanted Al_2O_3 waveguides. *J Appl Phys*, 1996, **79**(3): 1258~1265
- 22 Pasquale F D, Federighi M. Modeling of uniform and pair-induced upconversion mechanisms in high concentration erbium-doped silica waveguides. *Lightwave Techno*, 1995, **13**(9): 1858~1864
- 23 李淑凤,宋昌烈,巢明. 不同波长抽运的掺钕 Al_2O_3 光波导的荧光特性. 光电子·激光, 2001, **12**(1): 14~18
Li S F, Song C L, Chao M. *J Optoelectro Laser*, 2001, **12**(1): 14~18
- 24 李成仁,宋昌烈,李淑凤,等. 侧蚀对脊形掺钕光波导放大器净增益的影响. 半导体光电, 2005, **26**(1): 14~19
Li C R, Song C L, Li S F, *et al.* *Semiconductor Optoelectronics*, 2005, **26**(1): 14~19

Characteristics of Net Gain of Yb : Er Co-doped Al_2O_3 Waveguide Amplifier

Li Chengren^{1,2,3}, Li Shufeng¹, Song Qi¹, Li Jianyong¹, Song Changlie¹, Lei Mingkai³

¹ Department of Physics, Dalian University of Technology, Dalian 116024

² Department of Physics, Liaoning Normal University, Dalian 116024

³ Department of Materials Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024

Received date: 2005-04-20

Abstract Yb : Er co-doped Al_2O_3 films fabricated by the technique of the medium frequency magnetron sputtering were sculptured to rectangle waveguide amplifiers (YECDWA) with beeline channel. The relationship between net gain and pump power was measured. The results show that net gain of the YECDWA increases approximately linear as pump power is increased. The threshold is 18mW. The net gain of the 2.24 cm long YBCDWA is 8.44 dB pumped under 68 mW. The numerical simulation displays, however, that net gain of the YECDWA is 10.6dB pumped under same power.

Keywords Yb : Er co-doped waveguide amplifier; Fabrication of film; Net gain; Numerical simulation



Li Chengren was born in 1962 in Shengyang. He received the B. S. degree from Liaoning Normal University, the M. E. degree and D. E. degree from Dalian University of Technology (DUT). Now he is a postdoctor working in department of Materials Engineering at DUT. He has been working at Department of Physics, Liaoning Normal University since 1985. His research interests are in rare-earth doped waveguide amplifiers, nonlinear optics and chaos. He has published more than 40 papers.