

## 掺铒聚合物光波导放大器的数值分析\*

禹忠<sup>1,2</sup> 韦玮<sup>2</sup> 侯洵<sup>1</sup>

(1 西安交通大学电子信息工程学院, 西安 710049;

2 复旦大学电信工程学院先进光子材料与器件国家重点实验室, 上海 200433)

**摘要** 针对掺铒聚合物光波导放大器(EDWA), 提出了一种基于 Douglas 离散格式改进的有限差光束传播法(FD-BPM)的数值计算方法。对每一传输步长结合多能级速率方程计算出 EDWA 中光场传输强度分布, 及掺铒光波导放大器的增益传输特性。设计并研究了掺铒聚合物通道波导和 Y 形分束器的放大增益特性。在掺铒聚合物直波导中,  $\text{Er}^{3+}$ 浓度为  $9.0 \times 10^{25} \text{ ions} \cdot \text{m}^{-3}$ , 输入信号和泵浦光功率分别为  $1 \mu\text{W}$  和  $2 \text{ mW}$ , 其增益为  $1.6 \text{ dB/cm}$ ; 在掺铒聚合物 Y 形分束器中, 输出信号光分束比相等, 并能实现无损耗分束。

**关键词** 掺铒光波导放大器; 光束传播法; 聚合物

中图分类号 TN253 文献标识码 A

### 1 引言

聚合物集成光学器件与目前硅基光通信器件兼容性好, 加工工艺简单, 很容易通过分子改性实现或提高器件的性能, 目前在新一代光通信器件开发中受到人们的青睐<sup>[1]</sup>。染料掺杂聚合物分子中具有的  $\pi-\pi$  共轭结构有很大的吸收和激发发射截面, 已被大量应用于固体染料激光器中。但是, 其三重态吸收较大, 染料掺杂聚合物还不能用于连续波的放大中。稀土基络合物尤其铒基络合物的亚稳态寿命较长, 与目前光通信中广泛使用的通信窗口重合, 在有机聚合物中溶解性好, 逐渐被人们应用于聚合物波导放大器的研究开发中<sup>[2, 3]</sup>。

利用有限元法及 Runge-Kutta 法结合能级方程来模拟 EDWA 中的增益和传输特性<sup>[4]</sup>, 以及传输线法进行螺旋和折叠结构的 EDWA 结构优化等<sup>[5]</sup>方法大多只能用于无机掺铒光波导放大器的设计中, 并且算法复杂, 计算时间长。

本文提出了一种利用铒基络合物多能级方程和光束传播法对光波导放大器进行数值分析的方法。其中对 EDWA 中泵浦和信号光场利用 Douglas 离散格式进行改进有限差光束传播法(FD-BPM)求解。在每一步传输步长上求解能够描述铒离子与络合剂

在 EDWA 中相互作用的多能级速率方程, 得到各个能级离子数分布, 从而获得光波导放大器中光放大特性, 优化掺铒光波导放大器设计。

### 2 理论模型

铒离子等稀土离子在有机聚合物中没有很好的溶解性, 因此目前研究的聚合物光波导放大器材料都集中在稀土离子络合物掺杂的聚合物上。稀土离子络合物既可以增加稀土离子在聚合物中的溶解性, 又可以通过络合基团上添加发色官能团进行改性, 以提高吸收截面积, 从而提高稀土离子的泵浦效率。本文选用铒络合物 cyc-D 掺杂聚合物, 其分子结构如图 1 所示<sup>[6]</sup>。

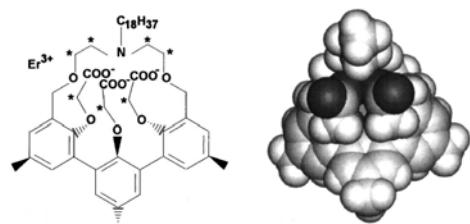


图 1 铑络合物 cyc-D 分子结构图和三维结构图

Fig.1 Molecule structure and the 3D structure of cyc-D

在铒基络合物掺杂聚合物中, 选用 980 或 1480

收稿日期 2005-01-26; 修改稿日期 2005-03-04

作者简介 禹忠(1973-), 男, 博士, 主要研究方向为聚合物光波导及放大器基础研究。通讯作者 侯洵(1936-), 男, 中国科学院院士, 教授, 主要从事光电发射材料及快速光电器件的研究。E-mail: houxun@opt.ac.cn

\*国家自然科学基金(60544001)资助项目

nm 的激光进行泵浦需较大的泵浦功率,如果选用 287 nm 作为泵浦波长,将与络合剂 cyc-H 中发色官能团的吸收峰重合,络合剂的吸收截面约  $8.5 \times 10^{-24} \text{ m}^2$ ,远高于 Er<sup>3+</sup>的吸收截面  $1.1 \times 10^{-24} \text{ m}^2$ ,因此可以通过二者间的能量传递增加铒离子体系的吸收截面积。如图 2 所示,泵浦光能量能够被络合剂中的发色官能团吸收,电子吸收能量以后从单重态 ( $S_1$ ) 向三重态 ( $T_1$ ) 跃迁,并且这个过程速度比较快,可以用近似二能级方程表示。然后,能量由  $T_1$  传递给 Er<sup>3+</sup>离子激发态  $^2\text{H}_{9/2}$  能级上。铒离子迅速从激发态  $^2\text{H}_{9/2}$  能级跃迁到亚稳态  $^4\text{I}_{13/2}$ ,亚稳态  $^4\text{I}_{13/2}$  能级向基态  $^4\text{I}_{15/2}$  跃迁形成受激辐射,实现光信号的放大,忽略其他能级上的跃迁,这个过程用三能级方程表示。因为配合基团与铒离子一一结合,能有效地隔离铒离子,近似认为过程中不存在协同上转化。

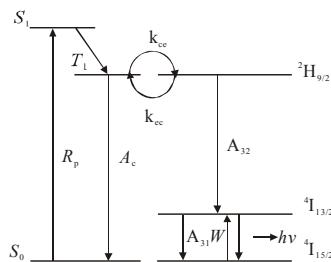


图 2 铒基络合物系统的能级示意图

Fig.2 Energy level diagram of erbium complex

掺铒络合物掺杂聚合物的多能级方程表示为

$$\frac{dN_2}{dt} = W(N_1 - N_2) - A_{21}N_2 + A_{32}N_3 \quad (1)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = -A_{32}N_3 + K_{ce}N_1N_c - K_{ec}N_{gc}N_3 \quad (2)$$

$$N_{\text{Er}} = N_1 + N_2 + N_3 \quad (3)$$

$$\frac{dN_c}{dt} = -R_c(N_c - N_{gc}) - A_cN_c - K_{ce}N_1N_c + K_{ec}N_{gc}N_3 \quad (4)$$

$$N_{cp} = N_c + N_{gc} \quad (5)$$

式中,  $N_1$ 、 $N_2$  和  $N_3$  分别是 Er<sup>3+</sup>能级  $^4\text{I}_{15/2}$ 、 $^4\text{I}_{13/2}$  和  $^2\text{H}_{9/2}$  上的电子分布数;  $N_{gc}$  和  $N_c$  分别是发色官能团单重态 ( $S_1$ ) 和三重态 ( $T_1$ ) 上的电子分布数; 铒离子浓度  $N_{\text{Er}}$  和络合基团浓度  $N_{cp}$  相等;  $A_{21}$ 、 $A_{32}$  和  $A_c$  分别是 Er<sup>3+</sup>能级  $^4\text{I}_{13/2}$ 、 $^4\text{I}_{11/2}$  和发色官能团三重态 ( $T_1$ ) 上向相应能级上跃迁转化速率。 $K_{ce}$  和  $K_{ec}$  为配合基团与 Er<sup>3+</sup>的传递速率; 配合基团的吸收截面远大于 Er<sup>3+</sup>

离子吸收截面,所以忽略从 Er<sup>3+</sup>向配合基团的反向能量传递  $K_{ec}N_{gc}N_3$ 。其中, 激发转化速率

$$R_c = \frac{I_p(x, y, z)}{h\nu_p} \sigma_c \quad (6)$$

$$W = \frac{I_s(x, y, z)}{h\nu_s} \sigma_{l2} \quad (7)$$

其中,  $I_p$  和  $I_s$  分别是泵浦光和信号光的强度,  $\nu_p$  和  $\nu_s$  分别是泵浦光和信号光的频率,  $h$  是 Planck 常数。 $\sigma_c$  是络合基团对泵浦光的吸收截面, Er<sup>3+</sup>的信号光发射截面  $\sigma_{l2}$  可以通过对实验所得的吸收光谱和发射光谱积分得到。有机基团在 Er<sup>3+</sup>离子亚稳态  $^4\text{I}_{13/2}$  能级上具有强烈的吸收,这个波长上 Er<sup>3+</sup>吸收截面比较难测,考虑到铒掺杂材料中在这个波长吸收截面和发射截面数量基本接近,假设 Er<sup>3+</sup>离子亚稳态  $^4\text{I}_{13/2}$  能级上吸收截面和发射截面相等。

### 3 光束传播法

目前对掺铒聚合物放大器计算采用的方法是对能级方程 (1) ~ (5) 求解稳态方程,得到各能级上粒子分布数,即  $N_1$  和  $N_2$ 。

在聚合物光波导放大器信号光传播方向的能量可以表示为

$$I = I_0 e^{kx} \quad (8)$$

其中,  $I_0$  为输入信号光场的初始值。增益系数  $k$  可以表示为

$$k = \sigma_{21}(N_2 - N_1)N_{\text{Er}} \quad (9)$$

因此通过求解传播方向的能量增加从而求出信号光增益值。这种方法计算简单,适合通道波导放大器的增益求解,但是并不适合较复杂波导图形中光场的增益求解。因此本文采用 FD-BPM 法建立对聚合物波导放大器光场求解模型。

在 EDWA 中泵浦光和信号光的光场满足 Helmholtz 方程:

$$\nabla^2 \Phi - k_0^2 \epsilon \Phi = 0 \quad (10)$$

式中,  $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$  是空间波数,复介电常数  $\epsilon$  用下式表示

$$\epsilon = \epsilon^w + \epsilon_0 \chi = \epsilon^w + \epsilon_0 (\chi' - i\chi'') \quad (11)$$

其中,  $\epsilon_0$  和  $\epsilon^w$  分别表示真空和波导中的介电常数,  $\chi'$  和  $\chi''$  分别是信号光和泵浦光复数原子极化常数  $\chi$

的实部和虚部。在波导传输长度较短，泵浦光能量与泵浦阈值接近前提下，忽略系统对泵浦光传播的影响。因此，波导放大器中增益表示为<sup>[7]</sup>

$$\chi'' = \epsilon^w \frac{g}{k_0} = \frac{\epsilon^w}{k_0} \sigma_{21} (N_2 - N_1) \quad (12)$$

信号光在 EDWA 中的增益系数可用下式表示

$$g = \sigma_{21} (N_2 - N_1) \quad (13)$$

泵浦光和信号光的复介电常数代入 Helmholtz 方程中，通过傍轴近似可得<sup>[8, 9]</sup>

$$\hat{\sigma} \frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\partial^2 \Phi(x, z)}{\partial x^2} + \nu \Phi(x, z) \quad (14)$$

式中， $\hat{\sigma} = 2j k_0 n_{\text{ref}}$ ； $\nu = k_0^2 (\epsilon - n_{\text{ref}}^2)$ ； $n_{\text{ref}}$  为参考折射率。通常，有限差光束传播法 (FD-BPM) 是对上式进行 Crank-Nicholson (CN) 格式差分，这种算法具有二阶误差  $O(\Delta x)^2$ ，且收敛性很好。本文采用 Douglas 差分方程式代替 Crank-Nicholson (CN) 差分方程式求解，其与采用 CN 差分方程的 FD-BPM 算法速度相当，而计算精度提高到四阶  $O(\Delta x)^4$ 。折射率通过传输相同步长  $\Delta z$  的信号光和泵浦光的强度进行修正，计算边界条件用 PML 边界条件，从而得到泵浦光和信号光的光场在器件中的传播特性。

## 4 计算结果与讨论

### 4.1 计算参数

利用 FD-BPM 算法对掺铒有机聚合物的光波导放大器进行模拟，计算窗口为 100 μm，x 方向步长为 0.4 μm，z 方向计算步长 4 μm。计算输入场分别是在泵浦波长 287 nm 和信号波长 1.54 μm 下的单模高斯场。波导芯层为铒络合物掺杂的聚苯基丙烯酸甲脂，芯层的宽和高都是 2 μm，折射率  $n_{c0}=1.57$ <sup>[10]</sup>。包层为聚甲基丙烯酸甲脂，折射率  $n_{cl}=1.48$ 。铒离子浓度  $N_{Er}$  和络合基团浓度  $N_{cp}$  均为  $9 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ 。 $A_{21}=1.25 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ ， $A_c=2 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ ， $K_{ce}=1 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ ， $\sigma_{21}=1.1 \times 10^{-24} \text{ m}^{-2}$ ， $\sigma_c=8.5 \times 10^{-22} \text{ m}^{-2}$ 。

### 4.2 结果与讨论

图 3 所示为掺铒聚合物通道放大器中泵浦长度的泵浦功率光对信号增益影响关系曲线。信号光功率为 1 μW，泵浦光功率在 0.01~10 mW 间取值。从图中可以看出，随着 EDWA 中泵浦功率的增加，增益不断提高。在低泵浦功率下，因为没有足够的

能量实现从能级  $^4I_{15/2}$  到  $^4I_{13/2}$  的粒子反转而使 EDWA 出现负增益；在高泵浦功率下，功率饱和效应使信号增益曲线趋于平坦。与无机掺铒波导放大器相比，聚合物光波导放大器 0-dB 增益阈值较低，这是因为络合物中发色官能团吸收截面积比单纯的铒离子大得多，能够充分地吸收泵浦光，并将其传递给所络合铒离子<sup>[11, 12]</sup>。

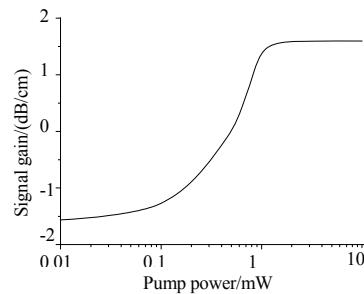


图 3 信号增益与泵浦长度的关系

Fig.3 Signal gain vs. pump length

图 4 所示为掺铒通道聚合物放大器模拟信号光场在掺铒光波导放大器中的传输过程。其中， $Er^{3+}$  浓度为  $9.0 \times 10^{25} \text{ ions} \cdot \text{m}^{-3}$ ，输入信号和泵浦光功率分别为 1 μW 和 2 mW，泵浦长度为 10 cm。由图中可以看出，EDWA 中随着泵浦长度的增加，光信号光强度不断增强并保持原有模式传播，计算结果表明信号光的增益为 1.6 dB/cm。

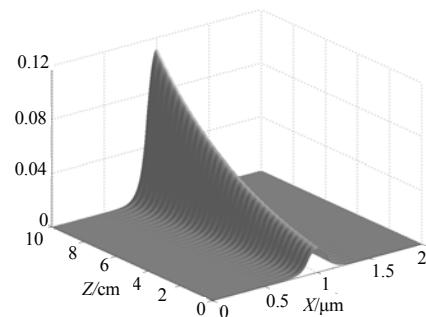


图 4 信号光场在掺铒聚合物通道光波导放大器中传输过程

Fig.4 Signal field in the erbium doped waveguide amplifier

对称 Y 形分束器能够将输入信号在输出端均分输出，是光通信常用器件之一，也是其他集成光学器件如光开关、调制器等的设计基础，对光通信系统有重要作用。图 5 所示是掺铒基聚合物对称 Y 形分束器的设计和输出特性。对称 Y 形分束器如图 5 (a) 所示，Y 分支长度  $L=2 \text{ cm}$ ，输入输出波导高度和宽度

$W=2\text{ }\mu\text{m}$ , Y分支两个分支最终间距 $H=16\text{ }\mu\text{m}$ 。为了减少分束器中的弯曲损耗, 波导路径的曲率半径按照正弦函数变化, 即横向坐标 $x$ 满足

$$x = \frac{H}{L}z - \frac{H}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi z}{L}\right) \quad (15)$$

图5(b)表明, Y形分束器的信号光功率在传输过程中平均分配, 经过2 cm传输后信号光被放大了3 dB, 从而实现无损耗Y分束器。

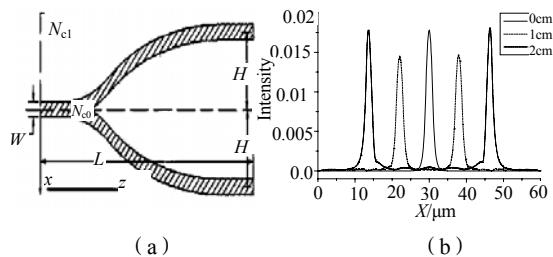


图5 掺铒聚合物对称Y形分束器的分析

Fig.5 Analysis of the erbium doped polymer Y-splitter

## 5 结论

本文根据铒络合物的物质间相互作用提出了一种掺铒聚合物光波导放大器的数值分析模型。利用FD-BPM对每一传输步长结合铒络合物多能级速率方程计算出EDWA中光场传输强度分布, 及掺铒光波导放大器的增益传输特性。计算结果表明, 络合物中发色官能团吸收截面积比单纯的铒离子大得多, 所以聚合物光波导放大器0-dB增益阈值较低。在掺铒聚合物通道波导中,  $\text{Er}^{3+}$ 浓度为 $9.0 \times 10^{25}\text{ ions}\cdot\text{m}^{-3}$ , 输入信号和泵浦光功率分别为 $1\text{ }\mu\text{W}$ 和 $2\text{ mW}$ , 其增益为 $1.6\text{ dB/cm}$ 。掺铒聚合物Y形分束器中, 输出信号光分束比相等, 并能实现无损耗分束。

## Numerical Model of Erbium Doped Polymer Waveguide Amplifier

YU Zhong<sup>1,2</sup> WEI Wei<sup>2</sup> Hou Xun<sup>1</sup>

(1 School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2 State Key Laboratory for Advanced Photonic Materials & Devices, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract** Numerical analysis method based on finite difference beam propagation method modified by Douglas scheme is presented for the erbium doped polymer waveguide amplifiers (EDWA). The gain properties of EDWA can be investigated in each step with the help of multi-level rate equations. As an example, erbium doped polymer channel waveguide and Y splitter are analyzed. The analysis shows that considerable gain levels,  $1.6\text{ dB/cm}$  can be achieved in the channel EDWA with an erbium concentration of  $9.0 \times 10^{25}\text{ ions}\cdot\text{m}^{-3}$ , signal power  $1\text{ }\mu\text{W}$  and pump power  $2\text{ mW}$ . A 3-dB Erbium complex doped polymer splitter can be achieved without loss.

**Key words** erbium doped waveguide amplifier; beam propagation method; polymer

## 参考文献

- [1] M Zhou. Low-loss polymeric materials for passive waveguide components in fiber optical telecommunication[J]. Optical Engineering, 2002, 41(7): 1631~1643
- [2] K Kuriki, Y Koike, Y Okamoto. Plastic Optical Fiber Lasers and Amplifiers Containing Lanthanide Complexes[J]. Chemical Reviews, 2002, 102(6): 2347~2356
- [3] A J Kenyon. Recent developments in rare-earth doped materials for optoelectronics[J]. Progress in Quantum Electronics, 2002, 26(4-5): 225~284
- [4] P Torres, A M Guzman. Complex finite-element method applied to the analysis of optical waveguide amplifiers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(3): 546~550
- [5] W B Huang, R R A Syms. Analysis of folded erbium-doped planar waveguide amplifiers by the method of lines[J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(12): 2658~2664
- [6] L H Slooff, A van Blaaderen, A Polman, et al. Rare-earth doped polymers for planar optical amplifiers[J]. Journal of Applied Physics, 2002, 91(7): 3955~3980
- [7] K E Alameh, R A Minasian, Y Zhao. Numerical model for the complex susceptibility of saturated erbium-doped amplifiers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1997, 33(5): 855~860
- [8] Y He, F G Shi. Improved full-vectorial beam propagation method with high accuracy for arbitrary optical waveguides[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(10): 1381~1383
- [9] J Yamauchi, J Shibayama, M Sekiguchi, et al. Finite-difference beam propagation method based on the generalized Douglas scheme for a nonuniform grid[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1997, 9(1): 67~69
- [10] L H Slooff, A Polman, M P O Wolbers, et al. Optical properties of erbium-doped organic polydentate cage complexes[J]. Journal of Applied Physics, 1998, 83(1): 497~503
- [11] M A Diaz-Garcia, S F De Avila, M G Kuzyk. Energy transfer from organics to rare-earth complexes[J]. Applied Physics Letters, 2002, 81(21): 3924~3926
- [12] G A Hebbink, L Grave, L A Woldering, et al. Unexpected sensitization efficiency of the near-infrared  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$ , and  $\text{Yb}^{3+}$  emission by fluorescein compared to eosin and erythrosine[J]. Journal of Physical Chemistry A, 2003, 107(14): 2483~2491