

阶跃掺杂 Er : Al₂O₃ 光波导放大器 增益特性数值模拟*

李成仁^{1,2} 宋昌烈² 李淑凤² 李建勇² 雷明凯³

(1 辽宁师范大学物理系, 辽宁 116029)

(2 大连理工大学物理系, 辽宁 116024)

(3 大连理工大学材料工程系, 辽宁 116024)

摘 要 构建了纵向阶跃非均匀掺杂的掺铒 Al₂O₃ 光波导放大器理论模型, 利用有限元法、速率方程和传输方程, 数值模拟了放大器的净增益特性. 计算结果表明: 阶跃掺杂掺铒 Al₂O₃ 光波导放大器提高了抽运效率, 净增益和信号光输出功率比优化后的均匀掺杂光波导放大器分别提高了 9.2% 和 90.5%, 长度却缩短了 16.9%.

关键词 集成光学; 掺铒 Al₂O₃ 光波导放大器; 纵向阶跃掺杂; 净增益

中图分类号 TN252 **文献标识码** A

0 引言

1996 年, 荷兰科学家 Hoven 等人首先用射频磁控溅射法, 在已氧化了一层 SiO₂ 薄膜的单晶硅基上沉积 Al₂O₃ 薄膜, 再用 100 KeV~1.5 MeV 的能量将铒离子均匀地注入到 Al₂O₃ 薄膜中, 并用离子束成功刻蚀了脊形掺铒 Al₂O₃ 光波导放大器. 1.48 μm、9 mW 的半导体激光器抽运下, 4 cm 长的光波导获得了 2.3 dB 的净增益^[1]. 这一成果激发了世界各国科学家和相关商业公司对掺铒光波导放大器 (EDWA: Erbium-Doped Waveguide Amplifier) 研究的极大兴趣^[2~4].

掺铒光波导放大器通过掺杂高浓度的铒离子, 在微小的芯片面积上即可获得较高的光信号增益. 可以预见, 掺铒光波导放大器将能与波分复用器、光滤波器、光探测器和激光器等有源、无源器件集成在同一个芯片中, 组成高效的光电集成器件. 因此, 掺铒光波导放大器的研究对全光网络通信技术和光电一体化等领域的发展有着重要的意义. 人们在掺铒基质材料选择、薄膜制备工艺、光波导放大器优化设计等方面进行了大量的探索^[5~12]. 但也由于高浓度的掺杂, 铒离子间易形成团簇, 产生合作上转换、激发态吸收和交叉弛豫等效应^[13~15], 影响了单级掺铒光波导放大器净增益的进一步提高. 虽然采用多级放大器级联方式以获得放大系统高的信号净增

益^[16~20], 但是挖掘单级放大器净增益的潜力, 无疑更有意义. 文中构建了信号光传输方向上非均匀掺杂的掺铒 Al₂O₃ 光波导放大器模型, 模拟计算了掺杂浓度阶跃变化的光波导放大器的净增益特性. 结果显示: 直线通道、阶跃掺杂的光波导放大器的净增益、信号光输出功率比已优化后的均匀掺杂光波导放大器的净增益、信号光输出功率分别提高了 9.2% 和 90.5%, 波导长度缩短了 16.9%.

1 理论模型

在已有的文献报道中, 掺铒薄膜制备都是均匀浓度掺杂, 如图 1 下部.

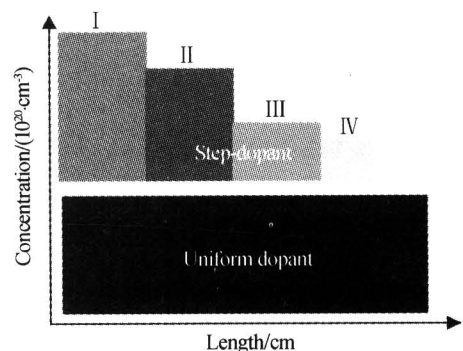


图 1 均匀掺杂/阶跃掺杂

Fig. 1 Diagram of uniform dopant/step dopant

图 2 是掺杂浓度为 $0.5 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ 、均匀掺杂的脊形掺铒 Al₂O₃ 光波导放大器抽运功率、净增益和信号光输出功率随波导长度的变化曲线 (初始输入的抽运功率和信号功率分别为 100 mW、1 μW, 纵轴仅标出抽运功率). 从图 2 中可以看到, 波导长度小于 8 cm 时, 净增益近似线性增长; 波导长度大于 8 cm 小于 13.5 cm 时, 净增益增长趋缓并饱和; 波导长度大于 13.5 cm 后, 净增益开始下降. 净增益

*国家自然科学基金 (No. 60478035)、辽宁省科学技术厅 (No. 20022110)、辽宁省教育厅 (No. 202123198) 和大连市科技局资助项目
Tel: 0411-84259566 Email: lshdg@sina.com.cn
收稿日期: 2004-12-07

增长趋缓和下降初始阶段, 抽运功率并没有降至为零, 只不过由于抽运功率降低以及合作上转换、激发态吸收等效应的影响, 亚稳态能级上的反转集居数密度不足以维持增益的快速增长, 甚至低于阈值集居数反转密度, 造成放大器的净增益下降. 倘若在一定长度(例如图 2 的 8 cm)的高浓度掺铒薄膜后面再连接着低掺铒浓度的薄膜, 如图 1 上部, 则在较低的抽运功率下, 仍能保持一定强度的反转集居数密度, 光信号被继续放大, 相当于更充分地利用了抽运功率. 这是因为较低掺铒浓度的光波导其本身吸收损耗降低, 且由合作上转换、激发态吸收等效应产生的影响也减弱. 模拟计算表明, 掺杂浓度接近线性规律连续递减的非均匀掺杂方式, 抽运效率最高. 但考虑到薄膜制备工艺的难易程度, 本文主要讨论在一定长度内的掺铒薄膜或光波导放大器由分段地掺杂不同掺铒浓度的薄膜或光波导放大器组成, 即掺铒浓度阶跃递减模式. 虽然所用模型并非最佳模型, 但也很好地利用了抽运功率, 较明显地改善了光波导放大器的净增益特性. 初步的薄膜沉积制备结果也表明阶跃掺杂薄膜能够实现, 可以设想阶跃非均匀掺杂将是未来发展方向之一.

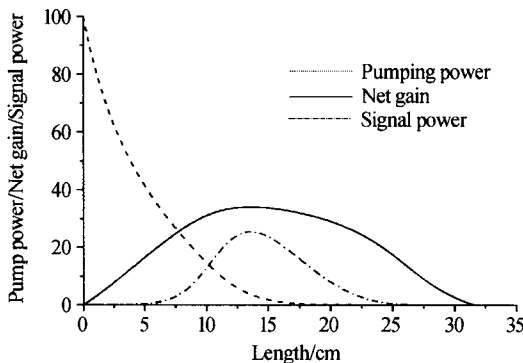


图 2 均匀掺杂光波导放大器抽运功率、净增益和信号光功率与波导长度的关系

Fig. 2 Relationship among length and pump power, net gain and signal power for uniform dopand EDWA

2 计算结果及讨论

实际计算采用: 1) 脊形截面, 如图 3, 导波层是掺铒 Al₂O₃、衬底为 SiO₂、上包层是空气; 2) 直线通道, 如图 4, 同向抽运; 3) 阶跃掺杂的掺铒 Al₂O₃ 光波导放大器模型, 如图 1 上部.

用有限元法分析了掺铒光波导放大器芯层内电磁场分布^[20]. 考虑了两级合作上转换、激发态吸收和交叉弛豫后, 图 5 铒离子五能级的相应速率方程为

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = -w_{13} N_1 + w_{31} N_3 + A_{21} N_2 + c_2 N_2^2 - R_{21} N_2 - R_{12} N_1 + c_3 N_3^2 - c_{14} N_1 N_4 \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = -A_{21} N_2 + A_{32} N_3 - 2c_2 N_2^2 - R_{21} N_2 + R_{12} N_1 + 2c_{14} N_1 N_4 \quad (2)$$

$$\frac{\partial N_3}{\partial t} = w_{13} N_1 - w_{31} N_3 - A_{32} N_3 + A_{43} N_4 - 2c_3 N_3^2 - w_{ESA} N_3 \quad (3)$$

$$\frac{\partial N_4}{\partial t} = -A_{43} N_4 + A_{54} N_5 + c_2 N_2^2 - c_{14} N_1 N_4 \quad (4)$$

$$\frac{\partial N_5}{\partial t} = -A_{54} N_5 + c_3 N_3^2 + w_{ESA} N_3 \quad (5)$$

$$N(x, y) = N_1(x, y) + N_2(x, y) + N_3(x, y) + N_4(x, y) + N_5(x, y) \quad (6)$$

$N(x, y)$ 为总的铒粒子数浓度, 与信号的传播方向无关, 并且不随时间变化.

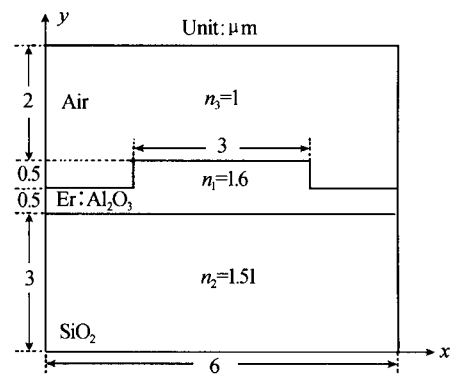


图 3 脊形 Er : Al₂O₃ 光波导截面

Fig. 3 Cross-section of rib Er : Al₂O₃ waveguide

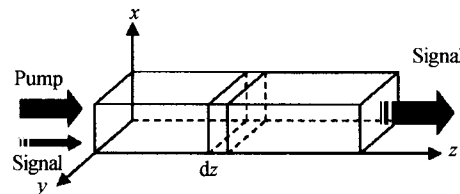


图 4 光波导信号传播

Fig. 4 Diagram of signal propagation in waveguide

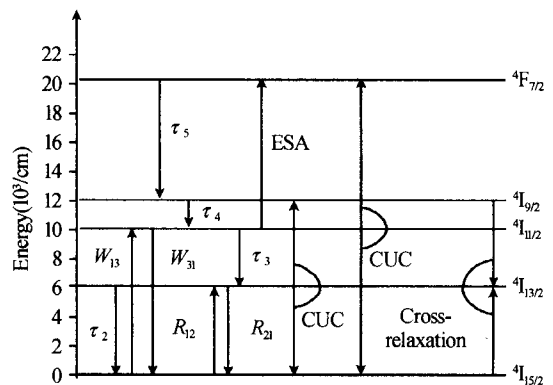


图 5 铒离子能级跃迁

Fig. 5 Energy level transition of Er³⁺ ions

式(1)~(5)中, $A_{ji} = 1/\tau_{ji}$ 为能级 j 至能级 i 的无辐射跃迁速率; w_{13} 和 w_{31} 是抽运光受激吸收和受激跃迁速率; c_2 、 c_3 和 c_{14} 分别表示相应能级的合作上转换系数和交叉弛豫系数; R_{12} 、 R_{21} 为信号光受激

吸收、受激跃迁速率; w_{ESA} 为 $^4I_{11/2}$ 能级的激发态吸收速率。

抽运光 (P_p)、信号光 (P_s) 和放大的自发辐射 (P_{ASE}) 在光波导内的传输方程分别为

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = -\gamma_p(z)P_p(z) \quad (7)$$

$$\frac{dP_s(z, \nu_s)}{dz} = [\gamma_{21}(z, \nu_s) - \gamma_{12}(z, \nu_s)]P_s(z, \nu_s) \quad (8)$$

$$\frac{dP_{ASE\pm}(z, \nu_j)}{dz} = \pm[\gamma_{21}(z, \nu_j) - \gamma_{12}(z, \nu_j)] \cdot P_{ASE\pm} \pm m h \nu_j \Delta \nu_j \gamma_{21}(z, \nu_j) \quad (9)$$

式中, m 是信号光激励下的导模数目; γ_p 为抽运光的吸收系数, γ_{12} 和 γ_{21} 分别为信号光的吸收系数和发射系数。

图6是均匀掺杂、掺铒浓度分别为1.1、0.9、0.7、0.5、0.3、0.1 $\times 10^{20}/\text{cm}^3$ 的脊形 Al_2O_3 光波导放大器净增益与光波导长度之间关系的数值模拟结果。抽运功率为 100 mW, 初始输入信号功率为 1 μW 。可以看出, 掺铒浓度升高, 最佳光波导长度下降。均匀掺杂光波导的最佳掺铒浓度为 $0.5 \times 10^{20}/\text{cm}^3$, 对应的净增益和波导长度分别为 33.8 dB、13.5 cm。

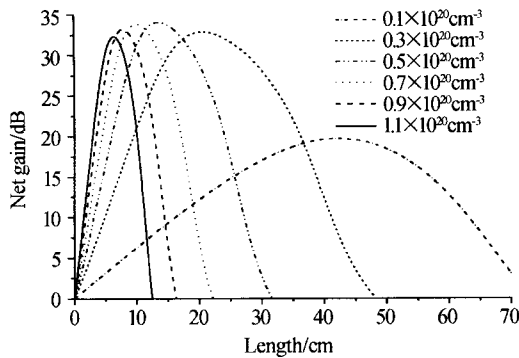


图6 均匀掺铒的光波导放大器净增益与长度关系
Fig. 6 Net gain of uniform doped EDWA vs. length

曾用自适应方法优化非均匀掺铒光波导放大器的掺杂浓度, 即依据每一步 (1 μm 长度) 计算后所余的抽运功率, 计算机综合判断、优化决定下一步的掺杂浓度。模拟结果显示掺杂浓度接近似线性规律连续递减的非均匀掺杂方式, 抽运效率最高, 光波导放大器的净增益最大。

阶跃非均匀掺杂浓度的优化则采用: 1) 首先计算多种浓度均匀掺杂的净增益特性, 如图 1 为例; 2) 人为地选择适度的掺杂浓度和光波导长度作为第一段进行计算; 3) 考虑上段光波导剩余的抽运功率, 再选择下一段的掺杂浓度和光波导长度; 4) 经几次相似计算, 可确定在一定初始抽运功率下的阶跃掺杂光波导放大器整体。需说明的是, 阶跃非均匀掺杂光波导放大器的数值模拟计算同样考虑了合作上转换、激发态吸收等效应和放大的自发辐射影响。

同样选取光波导放大器的初始信号功率和抽运功率分别为 1 μW 、100 mW。

图 7 中实线 b 是已优化最佳掺杂浓度为 $0.5 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ 的均匀掺杂脊形掺铒 Al_2O_3 光波导放大器净增益随波导长度的变化关系; 图 7 中曲线 a 是优化的阶跃掺杂的脊形掺铒 Al_2O_3 光波导放大器净增益随波导长度的变化关系。采用的是将光波导分为四段的模型: 靠近抽运源和信号源的一段光波导放大器长为 3 cm、高掺铒浓度为 $0.9 \times 10^{20}/\text{cm}^3$; 后三段的掺铒浓度依次降低, 分别为: $0.7 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ 、 $0.5 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ 、 $0.3 \times 10^{20}/\text{cm}^3$, 所对应的长度分别为 3 cm、3 cm 和 2 cm。从图 7 中可以看到, 阶跃掺杂光波导放大器的净增益最大值为 36.9 dB, 比已优化参量的均匀掺杂净增益最大值 33.8 dB 高出了 9.2%。同时, 阶跃掺杂的最佳长度 11.3 cm 也比均匀掺杂的 13.6 cm 缩短了 16.9%。

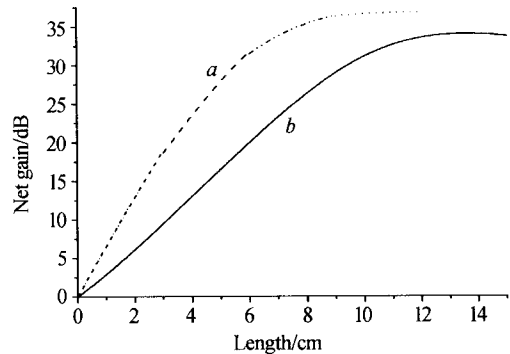


图7 阶跃掺铒光波导放大器净增益与长度关系
Fig. 7 Net gain of step dopant EDWA vs. length

图 8 中实线 b 是掺杂浓度为 $0.5 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ 的均匀掺杂脊形掺铒 Al_2O_3 光波导放大器输出信号功率随波导长度的变化关系。图 8 中曲线 a 是同一阶跃掺杂模型的脊形掺铒 Al_2O_3 光波导放大器输出信号功率随波导长度的变化关系。可以看出, 阶跃掺杂光波导放大器的输出信号功率最大值为 4.847 mW, 比已优化参量的均匀掺杂输出信号功率的最大值 2.545 mW 明显增强, 提高幅度达到了

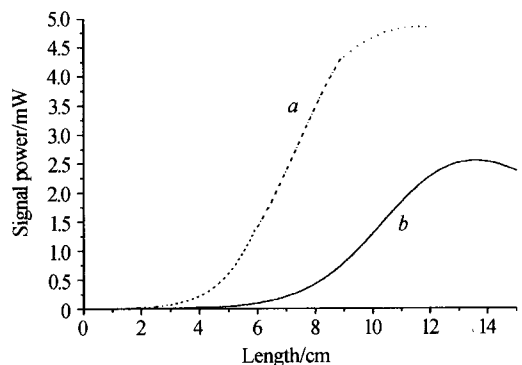


图8 阶跃掺铒光波导放大器信号功率与长度的关系
Fig. 8 Signal power of step dopant EDWA vs. length

90.5%.

3 结论

构建了阶跃掺杂的脊形掺铒 Al₂O₃ 光波导放大器模型,模拟计算其净增益特性.结果表明,在采用相同的计算理论基础上,阶跃掺杂掺铒 Al₂O₃ 光波导放大器比均匀掺杂掺铒 Al₂O₃ 光波导放大器更能充分地利用抽运功率,提高抽运效率.净增益和信号输出功率分别增大了 9.2%和 90.5%,而光波导长度却下降了 16.9%,这更有利于放大器器件的集成化.

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 Al₂O₃ waveguides on silicon. *Appl Phys Lett*, 1996, **68**(14):1886~1888
- 2 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
- 3 Kenyon A J. Recent developments in rare-earth doped materials for optoelectronics. *Progress in Quantum Electronics*, 2002, **26**(1):225~284
- 4 李淑凤,宋昌烈,李成仁,等.掺 Er: Al₂O₃ 光波导薄膜材料的制备及光学特性. *半导体光电*, 2003, **24**(5): 344~349
Li S F, Song C L, Li C R, et al. *Semiconductor Optoelectronics*, 2003, **24**(5): 344~349
- 5 Xiang O, Zhou Y, Ooi B S, et al. Optical properties of Er-doped SiO₂-GeO₂-Al₂O₃ planar waveguide fabricated by sol-gel process. *Thin Solid Film*, 2000, **370**(2):243~247
- 6 Strohhofer C, Polman A. Silver as a sensitizer for erbium. *Appl Phys Lett*, 2002, **81**(8):1414~1416
- 7 李成仁,宋昌烈,李淑凤,等.溶胶-凝胶(sol-gel)法制作掺铒 Al₂O₃ 薄膜及其光致发光光谱特性的测量. *光子学报*, 2003, **32**(12):1514~1517
Li C R, Song C L, Li S F, et al. *Acta Photonics Sinica*, 2003, **32**(12):1514~1517
- 8 Strohhofer C, Polman A. Absorption and emission spectroscopy in Er³⁺-Yb³⁺ doped aluminum oxide waveguides. *Optical Material*, 2003, **21**(5):705~712
- 9 高景生,宋昌烈,李成仁,等.中频溅射技术沉积铈共掺 Al₂O₃ 薄膜光致发光. *光子学报*, 2004, **15**(10):1162~1165
Gao J S, Song C L, Li C R, et al. *J Optoelectro Laser*, 2004, **15**(10):1162~1165
- 10 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
- 11 Lowe D, Syms R A, Huang W. Layout optimization for erbium-doped waveguide amplifiers. *J Lightwave Technol*, 2002, **20**(3):454~462
- 12 徐静,戴道铤,何赛灵.基于 PML 边界的有限差分法及其在光波道泄漏损耗计算中的应用. *光子学报*, 2003, **32**(12):1426~1429
Xu J, Dai D Z, He S L. *Acta Photonics Sinica*, 2003, **32**(12):1426~1429
- 13 Van den Hoven G N, Snoeks E, Polman A, et al. Upconversion in Er-implanted Al₂O₃ waveguides. *J Appl Phys*, 1996, **79**(3):1258~1265
- 14 Pasquale F D, Federighi M. Modeling of uniform and pair-induced upconversion mechanisms in high concentration erbium-doped silica waveguides. *Lightwave Technol*, 1995, **13**(9):1858~1864
- 15 李淑凤,宋昌烈,巢明.不同波长泵浦的掺铒 Al₂O₃ 光波导的荧光特性. *光子学报*, 2001, **12**(1):14~18
Li S F, Song C L, Chao M. *J Optoelectro Laser*, 2001, **12**(1):14~18
- 16 李成仁,宋昌烈,饶文雄,等.两片掺铒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
- 17 Li Chengren, Song Changlie, Li Shufeng, et al. Experimental investigation of photoluminescence spectra of Yb³⁺ sensitized Er³⁺-doped glass samples in series. *Chin Opt Lett*, 2003, **1**(11):664~667
- 18 李成仁,宋昌烈,李淑凤,等.脊形掺铒 Al₂O₃ 光波导放大器级联特性的模拟计算. *光子学报*, 2005, **34**(6):839~843
Li C R, Song C L, Li S F, et al. *Acta Photonics Sinica*, 2005, **34**(6):839~843
- 19 王兴军,曹宝胜,雷明凯. Sol-gel 法制备 Er³⁺-Yb³⁺ 共掺杂 Al₂O₃ 粉末光致发光特性. *光子学报*, Wang X J, Cao B S, Lei M K. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8):935~938
- 20 聂秋华,高媛,徐铁峰,等. Er³⁺/Yb³⁺ 共掺 TeO₂-Li₂O-B₂O₃-GeO₂ 玻璃系统光谱性质和热稳定性研究. *光子学报*, 2005, **34**(5):773~777
Nie Q H, Gao Y, Xu T F, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(5):773~777
- 21 李成仁,宋昌烈,李淑凤,等.侧蚀对脊形掺铒光波导放大器净增益的影响. *半导体光电*, 2003, **26**(1):14~19
Li C R, Song C L, Li S F, et al. *Semiconductor Optoelectronics*, 2003, **26**(1):14~19

Numerical Simulation of Net Gain Characteristics for Step Dopant Er : Al₂O₃ Waveguide Amplifier

Li Chengren^{1,2}, Song Changlie², Li Shufeng², Li Jianyong², Lei Mingkai³

1 Department of Physics of Liaoning Normal University, Liaoning 116029

2 Department of Physics of Dalian University of Technology, Liaoning 116024

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

Received date: 2004-12-07

Abstract The theoretical model of Er-doped waveguide amplifier with longitudinal step-dopant was build. The finite element method, rate equations and propagation equations were used to simulate numerically net gain characteristics of the amplifier. The results show that pumping efficiency of the amplifier is improved. Net gain and signal output power of step-dopant waveguide amplifier increase 9.2% and 90.5% respectively than uniform-dopant waveguide amplifier. Length of the amplifier, however, is shortened 16.9%.

Keywords Integrated optics; Er-doped Al₂O₃ waveguide amplifier; Longitudinal step-doped; Net gain



Li Chengren was born in 1962, in Shenyang. He received the B. S. degree from Liaoning Normal University, the M. E. degree from Dalian University of Technology (DUT). Since 2000 he has been attending the doctoral studies in department of physics 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 30 papers.