

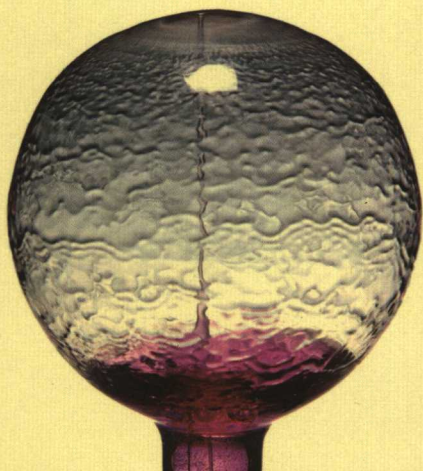
湖北省重点学科——光学学科建设经费资助

● 陈海燕 著

CANERLINSUANYAN BOLI GUANGBODAO FANGDAQI JI YINGYONG

掺铒磷酸盐玻璃 光波导放大器及应用

- 湖北长江出版集团
- 湖北科学技术出版社



湖北省重点学科——光学学科建设经费资助

●陈海燕 著

掺铒磷酸盐玻璃 光波导放大器及应用

CANERLINSUANYAN BOLI GUANGBODAO FANGDAQI JI YINGYONG

- 湖北长江出版集团
- 湖北科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

掺铒磷酸盐玻璃光波导放大器及应用/陈海燕著

武汉:湖北科学技术出版社,2006.9

ISBN 7—5352—3626—X

I. 掺… II. 陈… III. 磷酸盐—玻璃—光波导—
放大器—基本知识 IV. TN722.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第088834号

掺铒磷酸盐玻璃光波导放大器及应用

© 陈海燕 著

责任编辑:梁琼

封面设计:王梅

出版发行:湖北长江出版集团
湖北科学技术出版社

电话:87679468

地址:武汉市雄楚大街268号湖北出版文化城B座12—13层

邮编:430070

印刷:荆州市翔羚印刷有限公司

邮编:434000

787毫米×1092毫米

16开

7.25印张

170千字

2006年9月第1版

2006年9月第1次印刷

ISBN 7 - 5352 - 3626 - X/TN · 66

定价:19.50元

本书如有印装质量问题 可找承印厂更换

内容提要

本书较系统地介绍了掺铒磷酸盐玻璃光波导放大器的结构、材料、工作原理、数值模拟方法、离子交换制作工艺、放大器测试及其应用。全书共分七章,内容包括引言;掺铒磷酸盐玻璃光波导放大器基础;光波导的交变隐式差分方向一时域有限差分法分析集成光波导;掺铒光波导放大器特性;Er-Yb共掺磷酸盐玻璃波导放大器的制作与测试;宽带掺Er-Yb磷酸盐玻璃波导放大器设计;光波导放大器的应用。

本书具有一定的理论价值与应用价值,可作为从事有源光电子器件研究与应用的研究技术人员和高校教师的参考书,并可以作为高年级本科生和研究生教材。

前 言

工作在 $1.55\ \mu\text{m}$ 波段的掺铒(Er)光波导放大器(EDWA)是继半导体激光放大器、掺铒光纤放大器研制成功以来又一新型光放大器,较之掺铒光纤放大器,它能在同一衬底上提供无源的和有源的光路,具有损耗低、单位长度增益高、体积小、成本低、低噪声系数、很小的极化相关性以及不存在通道间的串扰等特点,可用作末端放大器、前置放大器、在线放大器、功率放大器以及光纤到家(FTTH)和光纤到路边(FTTC)光纤接入网中的无损分路器等。掺铒光波导放大器具有潜在的巨大市场前景。此外,它的出现还顺应了光电子器件向小型化、集成化方向发展的趋势。

由于高浓度掺杂光波导放大器在理论上比较复杂,制作工艺要求较高,波导—光纤耦合技术复杂等因素,使得其制作非常困难,这是这一器件还没有大量应用的主要原因之一。

光波导放大器的研究,最早可追溯到 20 世纪 70 年代,当时 Yajima 首次用溅射技术制作出掺铒激光器,直到 20 世纪 90 年代初,这一领域才有了很大的进展,此后,国内外诸多学者在这一领域开展了广泛、深入的研究。近六年来,作者在前人研究的基础上,对掺铒光波导放大器进行了一些探索性的研究,现将多年的总结成此著。本书共七章,第一章引言;第二章掺铒磷酸盐玻璃光波导放大器基础;第三章光波导的交变隐式差分方向—时域有限差分法分析;第四章掺铒光磷酸盐波导放大器特性;第五章 Er-Yb 共掺磷酸盐玻璃波导放大器的制作与测试;第六章宽带掺 Er-Yb 磷酸盐玻璃波导放大器的设计;第七章光波导放大器的应用。

由于作者水平有限,书中存在不妥或谬误之处,敬请读者批评指正!

本书的主要内容是作者在硕士研究生(1999~2002 年)与博士研究生(2002~2004 年)阶段完成的,期间,得到了恩师电子科技大学刘永智教授的关注与指导,在此谨向他表示衷心的感谢。

电子科技大学教务处副处长杨亚培教授,课题组成员戴基智副教授、周元庆副教授、张晓霞教授、庞涛副教授、刘爽副教授、饶建珍讲师等在多年的研究工作中给予了许多帮助,电子科技大学电子工程学院书记徐建华教授与电子科技大学招生办公室林红女士长期以来对我关心与帮助,宋健全博士后、陈德军博士、黄小丽、唐灿、汤卫国、黄光焰、苏洁梅、李长红等同学的有益讨论与制作工艺上的协作,在此一并表示衷心的感谢。

感谢所有教导过我的老师,每一步的成长都离不开他们的无私耕耘和辛勤的汗水。感谢支持我的老师、同事和朋友。

本书的出版得到了长江大学物理科学与技术学院院长徐大海教授、湖北省重点学科——光学学科各位老师的支持,在此一并表示衷心的感谢。

感谢冉先翠女士和女儿长期以来对我的关心、理解与支持。感谢我远在家乡的父母的默默支持!

作 者

2006 年 5 月于荆州

目 录

第一章 引 言	1
1.1 光波导放大器的国内外发展状况	1
1.2 光波导放大器的基质材料	2
1.3 光波导放大器的制作技术	3
1.4 本书的主要内容	4
参考文献	5
第二章 掺铒磷酸盐玻璃光波导放大器基础	11
2.1 光波导放大器的基本结构	11
2.2 光波导放大器的基本原理	12
2.3 光子—原子相互作用	12
2.3.1 自发辐射、受激吸收与受激辐射	12
2.3.2 泵浦与粒子数反转	13
2.3.3 受激辐射放大的增益系数	13
2.3.4 光功率沿激光介质波导的分布	14
2.4 磷酸盐玻璃基质中的 Er^{3+}	14
2.4.1 磷酸盐玻璃中 Er^{3+} 的本地结构	14
2.4.2 Er^{3+} 的电子结构	15
2.4.3 Er^{3+} 的能级结构及跃迁特性	15
2.5 影响掺 Er^{3+} 光波导放大器的主要因素	16
2.6 Yb^{3+} 敏化	17
2.7 Er^{3+} 在磷酸盐玻璃中的吸收与发射截面	18
2.8 描述 Er-Yb 耦合系统的速率方程	19
2.9 Er-Yb 共掺波导放大器(EYCDWA)速率方程简化	21
2.10 Er-Yb 共掺波导放大器的噪声、吸收损耗与增益上限	22
参考文献	23
第三章 光波导的交变隐式差分方向—时域有限差分法分析	25
3.1 麦克斯韦方程和 Yee 元胞	25
3.2 直角坐标系中的 ADI-FDTD	26
3.2.1 三维情形	27
3.2.2 二维情形	29
3.3 吸收边界条件	30
3.4 Er-Yb 共掺磷酸盐玻璃波导的 ADI-FDTD 分析	33
参考文献	34

第四章 掺铒磷酸盐玻璃光波导放大器特性	35
4.1 掺铒磷酸盐玻璃光波导放大器	35
4.1.1 低铒离子掺杂浓度情况	35
4.1.2 高铒离子掺杂浓度情况	37
4.2 铒—镱共掺磷酸盐玻璃光波导放大器	38
4.2.1 基于 ADI-FDTD 的重叠积分-Runge-Kutta 方法	38
4.3 EYCDWA 的数值模拟	39
4.3.1 EYCDWA 的小信号增益特性	39
4.3.2 EYCDWA 的噪声特性	42
4.3.3 EYCDWA 的大信号工作特性	43
4.3.4 EYCDWA 的增益饱和特性	46
4.3.5 EYCDWA 的宽带放大特性	47
4.4 步长对光波导放大器数值模拟的影响	47
4.5 提高 EYCDWA 增益的途径	48
参考文献	49
第五章 Er-Yb 共掺磷酸盐玻璃波导放大器的制作与测试	51
5.1 玻璃结构与离子交换	51
5.2 离子交换原理	52
5.2.1 用于离子交换的离子和离子对	52
5.2.2 离子交换反应	53
5.2.3 扩散方程及其解	54
5.3 离子交换铒/镱共掺磷酸盐玻璃光波导的制作	57
5.3.1 铒/镱共掺磷酸盐玻璃平面光波导的制作	59
5.3.2 铒/镱共掺磷酸盐玻璃沟道光波导的制作	61
5.3.3 铒/镱共掺磷酸盐玻璃掩埋光波导的制作	62
5.4 铒/镱共掺磷酸盐玻璃平面光波导的折射率分布	62
5.4.1 波导表面折射率的确定	64
5.4.2 波导折射率分布的确定	65
5.4.3 铒/镱共掺磷酸盐玻璃波导折射率分布	67
5.4.4 沟道铒/镱共掺磷酸盐玻璃波导折射率分布的确定	70
5.5 铒/镱共掺磷酸盐玻璃光波导放大器特性测试	72
5.5.1 波导与光纤间的耦合损耗	72
5.5.2 波导—光纤耦合模块的制作	73
5.5.3 EYCDWA 小信号增益测试	77
5.5.4 EYCDWA 噪声特性测试	79
参考文献	80
第六章 宽带掺 Er-Yb 磷酸盐玻璃波导放大器设计	81
6.1 宽带光波导放大器结构	81
6.1.1 带薄膜滤波器的单程集成结构	81
6.1.2 带薄膜滤波器的双程集成结构	81

6.1.3 带薄膜滤波器的多程集成结构	82
6.2 宽带光波导放大器理论分析	82
6.2.1 多层薄膜滤波器的透射函数	82
6.2.2 级联多层薄膜滤波器的透射函数	83
6.3 薄膜介质滤波器滤波特性分析	84
6.3.1 单级多层薄膜滤波器的滤波特性	84
6.3.2 级联多层薄膜滤波器的滤波特性	85
6.4 薄膜介质滤波器的设计	87
6.4.1 膜系优化设计的基本原理	88
6.4.2 介质薄膜滤波器膜系设计的评价函数	89
6.4.3 遗传算法基本原理	90
6.4.4 膜系设计结果	91
参考文献	92
第七章 光波导放大器的应用	93
7.1 基于 EDWA 的城域光网络系统	93
7.2 光波导放大器对通信系统容量的影响	94
7.2.1 高斯信道容量	94
7.2.2 带光波导放大器的通信系统容量	95
7.2.3 结果与讨论	96
7.3 光波导放大器用于多波长放大	97
7.4 阵列型 $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$ 共掺玻璃波导放大器	98
7.5 基于 $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃的有源波导环形腔滤波器	99
参考文献	101
结束语	103
附录 A ADI-FDTD 的重叠积分-Runge-Kutta 方法	104
附录 B 小信号 EYCDWA 增益特性计算源程序	105
附录 C 离子交换平面波导表面折射率分布计算源程序	107

第一章 引言

掺稀土元素光波导放大器(Rare-Earth Doped Waveguide Amplifiers)是继半导体激光放大器、掺铒(Er^{3+})光纤放大器(EDFA's)研制成功以来又一新型光放大器。由于掺 Er^{3+} 光波导放大器(EDWA)的工作波长与 $1.55 \mu\text{m}$ 波段的光通信传输窗口相吻合以及对人眼的安全性,十多年来一直是一个十分活跃的研究课题。较之 EDFA,它能在同一衬底上提供无源的和有源的集成光路,具有损耗低、单位长度增益高、体积小、低成本、低噪声系数、很小的极化相关性以及不存在通道间的串扰等特点,可用作末端放大器、前置放大器、在线放大器、功率放大器以及光纤到家(FTTH)和光纤到路边(FTTC)网络中的无损分路器等。由于其增益的限制,它主要应用于城域网和局域网。21 世纪初,法国 Teem Photonics 公司的副总裁 Denis barbier 教授曾预言掺 Er 光波导放大器将推动光网络的演变。

1.1 光波导放大器的国内外发展状况

首例掺稀土元素的有源光波导(平面光波导)器件是在 1972 年用溅射技术制作的掺钕激光器。之后约 20 年内,这一领域内无多大进展。1990 年掺稀土元素集成光波导放大器(尤其是掺 Er 光波导放大器)和激光器的开发取得了很大的进展,十多年来,这一器件的研究有了很大发展。

1991 年,日本的 kitagawa 等人首次在硅衬底上用火焰脱水沉积法制作出掺铒平板波导激光器;同年加拿大的 Honkanen 等人用离子交换法获得了掺铒磷酸盐单模玻璃光波导放大器,在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长附近单位长度的增益为 2 dB/cm ;1992 年 7 月,美国(贝尔实验室)的 Shmulovich 等人在硅基片上制成了 $1.55 \mu\text{m}$ 波段的掺铒光波导放大器,在 2.4 cm 长的器件上获得的增益正好补偿器件的损耗,观察到的净增益为 0;1993 年 1 月,日本的 kitagawa 等人制作了 4.7 mm 长的掺铒(含镱(Yb))光波导放大器,在 40 mW 功率泵浦下,得到 13.7 dB 净增益;同年美国的 Nykolak 等人在氧化硅衬底上制作出掺铒薄膜光波导放大器,在 4 cm 长的器件上获得了 15 dB 的增益;1996 年,Lucent 的 Ruby 等人制作出了阈值功率为 $8\sim 10 \text{ mW}$ 、净增益为 $3.7\sim 4.5 \text{ dB}$ 的掺铒平面光波导放大器;1997 年,美籍华人 Cheng Chun Li 等人制作了 1.7 cm 长的掺铒光波导放大器,其净增益为 7.2 dB ;1998 年,法国的 Barbier 等人制作了 8.6 cm 长的掺 Er/Yb 的玻璃光波导放大器,净增益为 27 dB ;2000 年 2 月,韩国的 Choi 等人制作了掺 Er/Al 的玻璃光波导放大器,在 20 mW 的泵浦(泵浦波长 980 nm)功率下获得了 5 dB 的增益;2002 年,中国香港城市大学的 S F Wong 等人用 $\text{Ag}^+ - \text{Li}^+$ 离子交换制作了铒镱共掺磷酸盐玻璃波导,用 980 nm 光泵浦,在 120 mW 的泵浦光功率作用下,得到了 3.3 dB/cm 的小信号净增益;2003 年,意大利的 Jose 等人用离子交换方法在 Er-Yb 共掺磷酸盐玻璃基质上制作出了光波导放大器和激光器,激光器的最大输出功率约 1.7 mW ,放大器的最大内增益约 11.3 dB ,信号光波长为 1534 nm ;香港城市大学的 Liu 等人用聚焦质子束辐射法在 $\text{Er}^{3+} - \text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃上制作出掩埋波导,在 90 mW 泵浦功率下,在 $1.534 \mu\text{m}$ 波长处获得了

1.3 dB/cm的小信号净增益;2004年, Kimmo Solehmainen 等人在硅基上制作了掺铒 Al_2O_3 波导,在 3.9 cm 长的波导上面得到了 6 dB 的增益。

在系统实验方面,1993年,美国 AT&T Bell 实验室的 Nykolak 等人对掺铒平面光波导放大器用于 1-Gb/s 传输系统的可行性进行了实验研究,结果表明:掺铒平面光波导放大器将在系统应用方面具有光明的前景;1996年和 1997年美国的 Delavaux 等人分别报道了将集成玻璃光波导放大器用于 10-Gb/s 光纤传输系统的实验,其误码率小于 10^{-12} ;2001年3月,美国 AT&T 公司的 Iannone 等人和法国 Teem Photonics 公司的 Barbier 领导的科研小组进行了四节点 160 km WDM 环行网络级连 EDWA's 系统(4×2.5 b/s)实验,取得了十分满意的效果,光波公司的 Pan 称这一实验标志着 EDWA 已真正用于实际光网络。

在国内,1999年,天津南开大学的宋峰等人利用 Kigre 公司提供的铒—镱共掺磷酸盐玻璃作为激光介质,在 $1.54 \mu\text{m}$ 附近得到了 10.2 mW 的激光输出;同年,北京理工大学的陈淑芬等人进行了有关掺铒铈酸锂光波导放大器的理论研究;2000年,中国科学院上海光学精密机械研究所的张龙等人对磷酸盐 Er 玻璃的荧光特性作了实验研究,实验表明磷酸盐 Er 玻璃是理想的 $1.5 \mu\text{m}$ 光波导放大器基质玻璃材料;2001年,大连理工大学的巢明等人在国家自然科学基金的资助下进行了有关掺铒 Al_2O_3 光波导放大器的理论研究;同年,中国科学院上海光机所的柳祝平等人进行了有关 Er^{3+} - Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃材料方面的研究,成功制作出了适合于离子交换的 Er^{3+} - Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃材料;与此同时,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的牛春晖等人对掺 Er 磷酸盐玻璃中红外发光特性进行了实验研究,实验表明磷酸盐 Er 玻璃是理想的 $1.5 \mu\text{m}$ 光波导放大器基质玻璃材料;2002年,中国科学院上海光机所的柳祝平等人进行了有关 LD 泵浦的 Er^{3+} - Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃材料激光性质方面的研究;中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的郑杰等人对离子交换铒掺杂磷酸盐玻璃波导特性进行了研究,所用玻璃是美国 Kigre 公司的,实验表明离子交换过程对材料的发光过程没有大的不良影响;2003年天津大学王颖、田贺斌等人对掺铒波导光放大器进行了理论研究;南开大学的宋峰等人在国家自然科学基金的资助下对 Er^{3+} - Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃激光器进行了理论分析,孟凡臻等人进行了 LD 泵浦的 $1.54 \mu\text{m}$ Er: Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃连续固态激光器研究,获得了 78.3 mW 的最大输出功率;2003年,中国科学院上海光机所的陈宝玉等人对其制作的、可用于离子交换的 Er^{3+} - Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃材料进行了热稳定方面的研究,实验结果非常满意;2004年2月上海交通大学的慕桓等人利用中国科学院上海光机所的 Er^{3+} - Yb^{3+} 共掺磷酸盐玻璃材料进行了离子交换波导制作的实验研究;我们自 2000 年就开始对掺铒光波导放大器进行理论与实验研究,并取得了一系列研究成果。

1.2 光波导放大器的基质材料

用于光波导放大器的激活掺杂粒子一般是 Nd(工作波长为 $1.06 \mu\text{m}$)、Er 和 Er-Yb 联合掺杂(工作波长为 $1.55 \mu\text{m}$)等。光波导放大器的基质一般是铈酸锂、石英—硅酸盐玻璃、磷酸盐玻璃、氧化物薄膜以及有机聚合物等。

1. 稀土元素掺杂铈酸锂基质材料

在铈酸锂基质材料中掺杂稀土元素制作成光波导放大器与激光器,其优点是可以将放大器、调制器与激光器方便地集成在一块芯片上。缺点是这类器件的稀土元素掺杂浓度不能太高、荧光效率低、增益较小,并且对偏振很敏感。

2. 稀土元素掺杂玻璃基质材料

在激光放大研究领域,多数选择玻璃作为掺杂的宿主基质,主要起因于高功率激光放大输出要求的驱使。目前,制作光波导放大器的玻璃材料主要是稀土元素掺杂的石英-硅酸盐玻璃与磷酸盐玻璃,掺杂的稀土元素主要是 Nd、Er 以及 Er-Yb 共掺。工作于 $1.55\ \mu\text{m}$ 光通信波段的掺 Er 以及 Er-Yb 共掺硅酸盐玻璃与磷酸盐玻璃备受关注。和硅酸盐玻璃相比,Er³⁺ 在磷酸盐玻璃中具有溶解度较高、受激发射截面大、荧光寿命长、不易发生荧光淬灭,上转换强度较弱等特点,尤其是与 Al、Yb 共掺还可大大提高 Er³⁺ 在磷酸盐玻璃中的溶解度以及泵浦效率,使得磷酸盐 Er 玻璃是制作高性能、超短长度光波导放大器的首选材料。

3. Er, Er-Yb 共掺杂氧化铝(Al₂O₃)薄膜基质材料

Er 在氧化铝(Al₂O₃)薄膜基质材料中具有较大的溶解度,在磷酸盐玻璃和硅酸盐玻璃中常加入适量的 Al₂O₃ 来提高 Er 的溶解度。掺 Er 氧化铝薄膜常用溅射或离子注入等方式在 Si 上获得,制作工艺复杂、设备昂贵,且增益很低以致有时观察不到,用 Yb 与之共掺所获得的增益也很有限。

4. 稀土元素掺杂有机聚合物基质材料

基于聚合物基质材料的光波导放大器是一种替代无机波导放大器的廉价替代品。用于光放大的稀土元素掺杂有机聚合物基质材料的研究始于 20 世纪 90 年代初期,理论研究表明它是一种很有前景的材料,传输损耗低、与光纤的耦合损耗也小。但稀土元素在有机聚合物中的溶解度非常小且不能直接掺杂,使得这类器件的制作非常复杂。

在聚合物中掺杂稀土元素有两种方法:一是将稀土元素装入有机类笼联合体中以提供同等位置来束缚稀土元素,并把其与周围离子屏蔽起来。这些联合体也导致相应的高吸收衰减的相关基团出现,从而极大地增加了泵浦功率。二是把掺杂稀土元素的 SiO₂ 与聚合物制作工艺相结合,将掺杂聚合物与掺 Er 硅胶质球结合形成波导。

1.3 光波导放大器的制作技术

自从 1991 年日本的 kitagawa 等人首次在硅衬底上用火焰脱水沉积法制作掺铒平板波导激光器以来,11 年来开发出了多种用于制作掺稀土元素的光波导放大器技术。

1. Er³⁺ 离子注入法

用 Er³⁺ 离子注入的方法已在 SiO₂、SiON 以及 Al₂O₃ 基质上成功制作出掺铒光波导。但这一制作方法耗时多,需要昂贵的设备,它不能用来制作大尺寸的复杂器件。

2. RF 溅射法/等离子体增强化学气相沉积法(PECVD)

RF 溅射法与等离子体增强化学气相沉积法用于制作掺 Er³⁺ 玻璃光波导。为了获得低损耗的波导,通常所用的衬底需加热或在高温下退火。这一方法的周期长。

3. 火焰水解涂覆法

火焰水解涂覆法也用于掺 Er³⁺ 玻璃光波导制作。在制作过程中需维持较高温度。这类波导具有低的传播损耗。然而,其掺杂元素浓度低,波导相对较长。

4. 离子交换技术

近些年来,一个多世纪来生产彩色玻璃的离子交换技术引起人们极大关注。不仅是因为它提高了玻璃的表面机械特性,更重要的是能在玻璃中形成波导。离子交换具有简单、易制作,且能控制光波导的数值孔径和尺寸大小等优点而成为制作掺 Er³⁺ 玻璃光波导的一种有效方法。然而,值得注意的是离子交换改变了衬底的组分,影响玻璃的光谱特性,也可能带来高

的传输损耗。这两个问题可用选择适当的衬底和制作参数来加以克服。到目前为止,单位长度上的增益最高的光波导放大器是用离子交换制作的磷酸盐玻璃光波导放大器。

5. 复合波导技术

将一片掺 Er^{3+} 玻璃压在用离子交换制作的无源波导上,形成复合的掺 Er^{3+} 波导,选择适当的波导和掺 Er^{3+} 玻璃的折射率,制作出的掺 Er^{3+} 玻璃光波导对光具有极好的导引作用。这一制作过程简单且成本低。但器件对所施加的压力极为敏感。这一问题可用在离子交换的波导上沉积掺 Er^{3+} 玻璃来解决,如用溶胶-凝胶(sol-gel)技术。

6. sol-gel 技术

近几年,关于光波导放大器材料方面的研究渐渐转向玻璃膜,其特点是制作成本低、适合高浓度掺杂。sol-gel 是一种制作高质量玻璃膜的方便技术,所制作出的玻璃膜均匀性好、并可批量生产,它在制作低成本集成光学和光电子器件方面有巨大的潜力。用 sol-gel 技术制作光波导放大器通常分为两个过程:一是用 sol-gel 技术在基质上制作掺杂玻璃膜,二是用传统方法在玻璃膜上制作波导。目前已在硅基、硅-钛基以及磷酸盐玻璃上成功制作出掺杂玻璃膜。由于用 sol-gel 技术制作光波导放大器还处于早期,效果并不理想,单位长度上所获得的最高增益只有 1.1 dB/cm,但它是一种很有前景的技术。

除了上述 6 种常用方法外,还有热压法、聚焦质子束辐射法、飞秒激光脉冲法以及表面等离子体化学气相沉积法等。表 1-1 给出了几种常见制作方法下的 EDWA 特性参数。

表 1-1 几种常见制作方法的 EDWA 特性

制作方法	施主材料	增益 (dB/cm)	净增益(dB) (at 980 nm)	损耗 (dB/cm)
溅射法	磷酸盐玻璃	2.6	>4.1(25 mW)	0.9
离子交换	磷酸盐玻璃	4.1	11.6	0.1
	硅酸盐玻璃	2.3	9	0.15
火焰水解涂覆法	$\text{P}_2\text{O}_5 : \text{SiO}_2$	0.68	18.9	0.15
等离子体增强化学气相沉积法	$\text{P}_2\text{O}_5 : \text{SiO}_2$	0.67	2.5	0.17
离子注入法	Al_2O_3	0.75	>3(10 mW)	0.35

小结:过去多年里,市场上已建立了两种不同技术来制作平面波电路(PLCs),即离子交换与各种沉积技术。在任何沉积过程(如 CVD, PECVD, FHD)中,PLC 器件是一层叠一层制作出来的,最后,我们获得了脊结构。这种产品生产中的每一步都需要精确处理。如果层与层之间有一个缺陷(不均匀沉积、微裂、微腔等),就会发生致命的失败,因为这些不均匀层的机械应力将降低器件的可靠性。离子交换技术没有上述缺点,是制作磷酸盐 Er 玻璃波导放大器的首选方法。

1.4 本书的主要内容

本书系统地介绍了掺铒磷酸盐玻璃光波导放大器的结构、材料、工作原理、数值模拟方法、离子交换制作工艺、放大器测试、宽带光波导放大器设计以及在通信系统中的应用。全书共分

七章,内容包括:引言;掺铒磷酸盐玻璃光波导放大器基础;光波导的交变隐式差分方向一时域有限差分法分析;掺铒光磷酸盐波导放大器特性;Er-Yb共掺磷酸盐玻璃波导放大器的制作与测试;宽带掺Er-Yb磷酸盐玻璃波导放大器的设计;光波导放大器的应用。

第一章光波导放大器研究的意义,回顾了光波导放大器的发展动态,光波导放大器的基质材料与制作技术,最后阐明了本书的章节安排。

第二章介绍掺铒磷酸盐玻璃光波导放大器基础,内容包括光波导放大器的基本结构、基本原理、光子-原子相互作用、磷酸盐玻璃基质中的 Er^{3+} 结构、影响掺 Er^{3+} 磷酸盐玻璃光波导放大器的主要因素、 Yb^{3+} 敏化、描述Er-Yb耦合系统的速率方程及噪声等。

第三章介绍光波导的交变隐式差分方向一时域有限差分法分析方法,内容包括麦克斯韦方程和Yee元胞,直角坐标系中的ADI-FDTD,吸收边界条件及应用举例等。

第四章介绍掺铒光磷酸盐波导放大器特性,内容包括掺铒光磷酸盐波导放大器,Er-Yb共掺磷酸盐玻璃波导放大器,EYCDWA的数值模拟,步长对光波导放大器数值模拟的影响及提高EYCDWA增益的途径等。

第五章介绍Er-Yb共掺磷酸盐玻璃波导放大器的制作与测试方法,内容包括玻璃结构与离子交换,离子交换原理,离子交换Er-Yb共掺磷酸盐玻璃波导的制作,Er-Yb共掺磷酸盐玻璃平面波导的折射率分布及Er-Yb共掺磷酸盐玻璃波导放大器测试等。

第六章介绍宽带掺Er-Yb磷酸盐玻璃波导放大器的设计方法,内容包括宽带光波导放大器结构,光波导放大器的理论分析,薄膜滤波器滤波特性分析及薄膜滤波器设计等。

第七章介绍光波导放大器的应用,内容包括基于EDWA的城域光网络系统,光波导放大器对通信系统容量的影响,光波导放大器用于多波长放大及阵列光波导放大器,有源波导环形腔滤波器等。

结束语对本书内容进行概括,指明下一步研究方向。

参考文献

- [1] Donald Zimmerman R, Leo Spiekman H. Amplifiers for the Masses: EDFA, EDWA, and SOA Amplets for Metro and Access Applications[J]. Lightwave Technology, 2004, 22(1): 63-70.
- [2] J J Pan, Guan Kejian, Qiu Xiangdong, et al. Advantages of low-cost, miniature, intelligent EDFAs, for next-generation dynamic metro/access networks[J]. Optical Fiber Technology, 2003, 9: 80-94.
- [3] Ricardo Olivares. A New WDM Amplifier Cascade for Improved Performance in Wavelength-Routed Optical Transport Networks[J]. Optical Fiber Technology, 1999, 5: 62-74.
- [4] Denis barbier. Erbium-doped waveguide amplifiers promote optical-networking evolution[J]. Lightwave, 2000, 11: 19-20.
- [5] Delavaux J M P, Mcintosh C, Shmulovich J, et al. Gain flatness of a planar optical waveguide amplifier [C]. OFC2000, Maryland, WA2.
- [6] Barbier D. The present and future of EDWA technology[C]. Technical program committee OFC2002, Anaheim California, TuB3.
- [7] Portch D, Syms R R A, Huang W. Folded-Spiral EDWAs with Continuously Varying Curvature[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2004, 16(1): 1-3.
- [8] Yajima H, Kawase S, Sekimoto Y. Amplification at 1.06 μm using a Nd: glass thin film waveguide[J]. Appl. Phys. Lett., 1972, 39(3): 407-410.
- [9] Polman A, Lidgard A, Jacobson D C, et al. 1.54 μm room-temperature luminescence of MeV erbium-implanted silica glass[J]. Appl. Phys. Lett., 1990, 57(26): 2859-2861.

- [10] Kitagawa T, Hattori K, Shimizu M, et al. Guided-wave laser based on erbium-doped silica planar light-wave circuit[J]. *Electron. Lett.*, 1991,27(3): 334—335.
- [11] Honkanen S, Najafi S, Poyhonen P. Silver-film ion-exchanged singlemode waveguides in Er doped phosphate glass[J]. *Electron. Lett.*, 1991,27(23): 2167—2168.
- [12] Shmulovich J [J], Wong A, Wong Y H, et al. Er³⁺ glass waveguide amplifier at 1.5 μm on silicon[J]. *Electron. Lett.*, 1992, 28(13): 1181—1182.
- [13] Kitagawa T, Hattori K, Hibino Y, et al. Erbium-doped composite glass waveguide amplifier [J]. *Electron. Lett.*, 1993,29(1): 131—132.
- [14] Nykolak G, Haner M, Becker P C et al. Systems evaluation of an Er³⁺-doped planar waveguide amplifier [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1993,5(10): 1185—1187.
- [15] Ghosh R N, Shmulovich J, Kane C F, et al. 8-mV threshold Er³⁺-doped planar waveguide amplifier[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1996, 8 (4): 518—520.
- [16] Shmulovich J, Ghosh R N, Kane, et al. Planar Er waveguide amplifier with 8-mW threshold[C]. *Optical Fiber Communications(OFC'96)*, 1996:250—251.
- [17] Cheng Chun Li, Hong Koo Kim, Michele Migliuolo. Er-doped glass ridge-waveguide amplifiers fabricated with a collimated sputter deposition technique [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1997, 9 (9): 1223—1225.
- [18] Barbier D, Bruno P, Cassagnettes C, et al. Net gain of 27 dB with a 8.6-cm-long Er/Yb-doped glass-planar-amplifier[C]. *Opt. Fiber Commun. Con., OFC'98 Technical Digest*: 45—46.
- [19] Choi Y B, Cho S H, Moon D C. Er-Al-codoped silicate planar light waveguide-type amplifier fabricated by radio-frequency sputtering[J]. *Optics Lett.*, 2000,25(4): 263—265.
- [20] Wong S F, Pun E Y B, Chung P S. Er³⁺-Yb³⁺ codoped phosphate glass waveguide amplifier using Ag⁺-Li⁺ ion exchange[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002,14(1): 80—82.
- [21] Jose G, Sorbello G, Taccheo S, et al. Active waveguide devices by Ag-Na ion exchange on erbium-ytterbium doped phosphate glasses[J]. *Non-Crys. Solides*, 2003,322: 256—261.
- [22] Liu K, Puri E Y B, Sum T C, et al. Erbium doped waveguide amplifiers fabricated using focused proton beam irradiation [J]. *IEEE 16th Annual Meeting of Lasers and Electro-Optics, LEOS 2003*, 2003, 1: 132—133.
- [23] Kimmo Solehmainen, Markku Kapulainen, Paivi Heimala. Erbium-doped waveguides fabricated with atomic layer deposition method[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(1): 194—196.
- [24] Delavaux J-M P, Park Y K, Murphy E, et al. High performance Er-Yb planar waveguide amplifiers as in-line and pre-amplifiers in 10 Gb/s fiber system experiments[C]. *22nd European Conference on Optical Communication, ECOC '96*, 1996,5: 23—26.
- [25] Delavaux J-M P, Granlund S, Mizuhara O, et al. Integrated optics erbium-ytterbium amplifier system in 10-Gb/s fiber transmission experiment[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997,9(2): 247—249.
- [26] Reichmann K C, Iannone P P, Birk M, et al. An eight-wavelength 160 km transparent metro WDM ring network featuring cascaded erbium-doped waveguide amplifiers[J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2001,13(10): 1130—1132.
- [27] Iannone P P, Reichmann K C, Birk M, et al. A 160 km transparent metro WDM ring network featuring cascaded erbium-doped waveguide amplifiers[C]. *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit*, 2001,3: WBB3—1—WBB3—3.
- [28] Song Feng, Chen Xiaobo, Feng Yan. LD 泵浦的共掺 Er³⁺, Yb³⁺ 磷酸盐玻璃激光器[J]. *中国激光*, 1999, A26(9): 790—792.
- [29] 陈淑芬, 卢文杰, 胡维晟. 掺铒铈酸锂光波导放大器增益特性的理论分析[J]. *光学技术*, 1999, 3: 44—

- [30] 张龙,林凤英,祁长鸿,等. 用于 $1.5\mu\text{m}$ 光波导放大器的高浓度 Er^{3+} 掺杂玻璃[J]. 光学学报, 2000, 20(12): 1692—1693.
- [31] 巢明,李淑凤,宋昌烈. 掺铒 Er^{3+} Al_2O_3 平面光波导放大器理论计算[J]. 大连理工大学学报, 2001, 41(1): 24—28.
- [32] 柳祝平,戴世勋,胡丽丽. Yb^{3+} , Er^{3+} 共掺磷酸盐玻璃光谱性质研究[J]. 中国激光, 2001, 28(5): 467—470.
- [33] 牛春晖,曹望和,臧春雨,等. 掺 Er 磷酸盐玻璃中红外发光特性研究[J]. 发光学报, 2001, 22(4): 357—361.
- [34] 柳祝平,胡丽丽,戴世勋,等. LD 泵浦的 Er^{3+} , Yb^{3+} 共掺杂磷酸盐铒玻璃激光性质[J]. 发光学报, 2002, 23(3): 238—242.
- [35] 郑杰,马少杰,张家骅. 离子交换铒掺杂磷酸盐玻璃波导特性研究[J]. 中国激光, 2002, 29(5): 447—449.
- [36] 王颖,杨天新,孙伟成,等. 条形掺铒波导光放大器的理论分析[J]. 光通信技术, 2003, 9: 42—44.
- [37] 田贺斌,杨天新,王颖,等. Er^{3+} , Yb^{3+} 共掺玻璃波导放大器及其应用[J]. 光通信技术, 2003, 1: 34—37.
- [38] 宋峰,孟凡臻,丁欣,等. Er^{3+} - Yb^{3+} 共掺玻璃激光器的速率方程及数值分析[J]. 物理学报, 2002, 51(6): 1233—1238.
- [39] Meng Fanzhen, Song Feng, Zhang Chaobo, et al. Laser Diode Pumped $1.54\mu\text{m}$ Er: Yb: Phosphate Glass Continuous Wave Compact Laser[J]. Chin. Phys. Lett., 2003, 20(10): 1739—1740.
- [40] Chen Baoyu, Zhao Shilong, Hu Lili. Novel Chemically Stable Yb^{3+} - Er^{3+} Codoped Phosphate Glass for Ion-Exchanged Active Waveguide Devices[J]. Chin. Phys. Lett., 2003, 20(11): 2056—2057.
- [41] 慕桓,陆加佳,金国良,等. 掺铒玻璃 Ag^+ - Na^+ 离子交换光波导的分析. 上海交通大学学报, 2004, 38(2): 248—251.
- [42] 陈海燕,官周国,刘永智. 掺 Er^{3+} 玻璃光波导放大器的新进展[J]. 半导体光电, 2000, 21(6): 381—383.
- [43] 陈海燕. $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃光波导放大器的设计与制作研究[D], 2002, 硕士论文, 中国优秀博硕士学位论文全文数据库.
- [44] 陈海燕等. $1.55\mu\text{m}$ 掺铒光波导放大器最新进展. 激光与红外[J], 2005, 35(7): 463—465.
- [45] 陈海燕. 宽带掺 Er 光波导放大器关键技术研究[D], 2005, 博士论文, 中国优秀博硕士学位论文全文数据库.
- [46] Kholodkov A V, Golant K M. Surface plasma CVD as a new technological platform for Er-doped waveguide amplifiers and lasers[C]. The 29th Annual Conference on Optical Fiber Communication (OFC'04), Los Angeles, FJ5.
- [47] Lallier E, Pocholle J P, Papuchon M, et al. Integrated Nd: MgO: LiNbO₃ FM mode-locked waveguide laser[J]. Elect. Lett., 1991, 27(11): 936—937.
- [48] Lallier E, Papillon D, Pocholle J P, et al. Integrated Q-switched Nd: MgO: LiNbO₃ waveguide laser[J]. Elect. Lett., 1992, 28(15): 1428—1429.
- [49] Brinkmann R, Baumann I, Dinand M, et al. Erbium-doped single-pass and double-pass Ti: LiNbO₃ waveguide amplifiers[J]. IEEE J. Quantum Electronics, 1994, 30: 2356—2360.
- [50] Grobncic D M, Puscas N N. Study of the amplified emission noise reconstruction of Er: Ti: LiNbO₃ waveguides[J]. Int. J. Opto., 1995, 10(4): 285—288.
- [51] Chi-Hung Huang, McCaughan L. Er-indiffused Ti: LiNbO₃ channel waveguide optical amplifiers pumped at 980 nm[J]. Electron. Lett., 1996, 32(3): 215—216.
- [52] Huang C-H, McCaughan L. 980-nm-pumped Er-doped LiNbO₃ waveguide amplifiers: a comparison with 1484 nm pumping[J]. IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics, 1996, 2(2): 367—372.

- [53] Chi-Hung Huang, Mc Caughan L. Photorefractive-damage-resistant Er-indiffused MgO: LiNbO₃ ZnO-waveguide amplifiers and lasers[J]. *Electron. Lett.*, 1997, 33(19) : 1639–1640.
- [54] Voinot V, Ferriere R, Goedgebuer J P. Polarisation-independent Er: Ti: LiNbO₃ waveguide amplifier pumped by a laser diode at 980 nm[J]. *Electron. Lett.*, 1998, 34(6) : 549–550.
- [55] Kitagawa T, Hattori K, Shuto K, et al. Amplification in erbium-doped silica-based planar lightwave circuits[J]. *Electron. Lett.*, 1992, 28 : 1818–1819.
- [56] Snoeks E, Van den Hoven G N, Polman A. Optimization of an Er-doped silica glass optical waveguide amplifier[J]. *IEEE J. Quantum Electronics*, 1996, 32(9) : 1680–1684.
- [57] Hattori K, Kitagawa T, Oguma M, et al. Erbium-doped silica-based waveguide amplifier integrated with a 980/1530 nm WDM coupler[J]. *Electron. Lett.*, 1994, 30(11) : 856–857.
- [58] Shmulovich J, Muehlner D J, Bruce A J, et al. Erbium-doped planar waveguide amplifiers integrated with silica waveguide technology[C]. *OFC'2000*, 2000, 2 : 2.
- [59] Takada K, Oguma M, Yamada H, et al. Gain distribution measurement of an erbium-doped silica-based waveguide amplifier using a complex OLCR[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, 9(8) : 1102–1103.
- [60] Kawanishi S, Hattori K, Takara H, et al. Actively modelocked ring laser using Er-doped silica-based planar waveguide amplifier[J]. *Electron. Lett.*, 1995, 31(5) : 363–364.
- [61] Hattori K, Kitagawa T, Oguma M, et al. Erbium-doped silica-based planar waveguide amplifier pumped by 0.98 μm laser diodes[J]. *Electron. Lett.*, 1993, 29(4) : 357–359.
- [62] Kitagawa T, Hattori K, Shuto K, et al. Amplification in erbium-doped silica-based planar lightwave circuits[J]. *Electron. Lett.*, 1992, 28 (19) : 1818–1819.
- [63] Bjarklev A, Berendt M O, Broeng J, et al. Progress on erbium-doped waveguide components[C]. 1997 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference, 1997. 'Linking to the Next Century'. 1997, 1 : 317–322.
- [64] Rasmussen T, Lumholt O, Povlsen J H, et al. Optimum core design for erbium-doped integrated optical amplifiers in silica-on-silicon[J]. *Electron. Lett.*, 1993, 29(5) : 455–456.
- [65] Polman A. Miniature erbium doped planar optical amplifiers[C]. 27th European Conference on Optical Communication, ECOC '01, 2001, 4 : 632–633.
- [66] D'Orazio A, De Sario M, Mescia L, et al. Design of Er³⁺/Yb³⁺ doped silica/titania planar waveguide amplifier[C]. 5th International Conference on Transparent Optical Networks Proceedings of 2003, 2003, 1 : 231–235.
- [67] Chryssou C E, Di Pasquale, Pitt F. Er³⁺-doped channel optical waveguide amplifiers for WDM systems: a comparison of tellurite, alumina and Al/P silicate materials[J]. *IEEE J. Select. Topics in Quantum Electronics*, 2000, 6 (1) : 114–121.
- [68] Aoki H, Ishikawa E, Asahara Y. Nd³⁺-doped glass waveguide amplifier at 1.054 μm [J]. *Electron. Lett.*, 1991, 27(25) : 2351–2353.
- [69] Loffler P J, Sautter H, Bosch R. Experimental Investigations for Modeling a 1.3 μm Waveguide Amplifier[C]. *Conference on Lasers and Electro-optics Europe*, 1996 : 274–274.
- [70] Blaize S, Broquin J E, Barbier D, et al. 1.55 μm DFB laser integrated on erbium doped phosphate glass substrate[C]. 2000 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe, 2000, 1 : 183.
- [71] Barbier D, Delavaux J-M P, Strasser T A, et al. Sub-centimeter length ion-exchanged waveguide lasers in Er/Yb doped phosphate glass[C]. 11th International Conference on Integrated Optics and Optical Fibre Communications 23rd European Conference on Optical Communications, 1997, 4 : 41–44.
- [72] Pun E Y B. Planar optical waveguide amplifiers[C]. 2002 IEEE Electron Devices Meeting Proceedings,

- [73] Kik P G, Polman A. Cooperative upconversion as the gain-limiting factor in Er doped miniature Al_2O_3 optical waveguide amplifiers[J]. *Appl. Phys.*, 2003,93(9): 5008—5012.
- [74] Chryssou C E, Di Pasquale F, Pitt C W. Improved gain performance in Yb^{3+} -sensitized Er^{3+} -doped alumina (Al_2O_3) channel optical waveguide amplifiers[J]. *Lightwave Technol.*, 2001, 19(3): 345—349.
- [75] 李淑凤, 宋昌烈, 李成仁, 等. 掺 $\text{Er Al}_2\text{O}_3$ 光波导薄膜材料的制备及光学特性[J]. *半导体光电*, 2003,24(5): 344—348.
- [76] Chen R T, Lee M, Natarajan S, et al. Single-mode Nd^{3+} -doped graded-index polymer waveguide amplifier[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, 5(11): 1328—1331.
- [77] Koeppen C, Yamada S, Jiang G, et al. Rare-earth organic complexes for polymer optical fiber and waveguide amplifiers[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO '96*, 1996: 392—393.
- [78] Slooff L H, Kik P G, Tip A, et al. Pumping Planar Waveguide Amplifiers Using a Coupled Waveguide System[J]. *Lightwave Technol.*, 2001,19(11): 1740—1744.
- [79] Slooff L H, van Blaaderen A, Polman A. Rare-earth doped polymers for planar optical amplifiers[J]. *Appl. Phys.*, 2002:3955—3980.
- [80] Brown C T A, Warburton T J, Shepherd D P, et al. An efficient, high-gain diode-pumped $\text{Nd}:\text{YAG}$ planar waveguide amplifier[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO '97*, 1997, 11: 306—307.
- [81] Polman A, Lidgard A, Jacobsen D C, et al. 1.54 μm room temperature luminescence of MeV erbium ion implanted silica glass[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990,57: 2859—2861.
- [82] Lidgard A, Polman A, Jacobsen A, et al. Fluorescence lifetime studies of MeV erbium implanted silica glass[J]. *Electron. Lett.*, 1991,27: 993—995.
- [83] Lman A, Jacobson D C, Eaglesham D J, et al. Optical doping of waveguide materials by MeV Er implantation[J]. *Appl. Phys.*, 1991,22(10): 3778—3784.
- [84] Chelnokov A V, Lourtioz J-M, Boucard P, et al. Deep high-dose erbium implantation of low-loss silicon oxynitride waveguides[J]. *Electron. Lett.*, 1994, 30: 1850—1852.
- [85] Van Der Hoven G N, Koper R J I M, Polman A, et al. Net optical gain at 1.53 μm in Er doped Al_2O_3 waveguides on silicon[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996,68: 1886—1888.
- [86] Nykolak G, Becker P C, Schmulovich J, et al. Concentration-dependent I lifetimes in Er-doped fibers and Er-doped planar waveguides[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993,5: 1014—1016.
- [87] Hehlen M P, Cockroft N J, Gosnell T R, et al. Uniform upconversion in high-concentration Er-doped soda lime silicate and aluminosilicate glasses[J]. *Opt. Lett.*, 1997, 22: 772—774.
- [88] Cheng Chung Li, Hong Koo Kim, Migliuolo M. Er-doped glass ridge-waveguide amplifiers fabricated with a collimated sputter deposition technique [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, 9(9): 1223—1225.
- [89] Shuto K, Hattori K, Kitagawa T, et al. Erbium-doped phosphosilicate glass waveguide amplifier fabricated by PECVD[J]. *Electron. Lett.*, 1993, 29(2): 139—141.
- [90] Guldborg-Kjaer S A, Hübner J, Kristensen M, et al. Planar waveguide laser in Er/Al-doped germanosilicate[J]. *Electron. Lett.*, 1999,35: 302—303.
- [91] Chryssou C E, Pitt C W. Er-doped Al_2O_3 thin films by plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) exhibiting a 55 nm optical bandwidth[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, 34: 282—285.
- [92] Tumminelli R, Hakimi F, Haavisto J. Integrated optics Nd-glass laser fabricated by flame hydrolysis deposition using chelates[J]. *Opt. Lett.*, 1991,16(5): 1098—1100.
- [93] Bebbington J A, Barbarossa G, Bonar J R, et al. Rare earth doped silica waveguides on Si fabricated by flame hydrolysis deposition and aerosol doping[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993,62: 337—339.