

文章编号: 1001-3806(2004)06-0604-05

光波导放大器的研究进展

苏洁梅, 戴基智, 杨亚培
(电子科技大学 光电信息学院, 成都 610054)

摘要: 总结了光波导放大器近年来的研究新进展, 介绍了在材料、制作工艺和波导结构方面取得的成果, 分析了今后光波导放大器的研究方向。

关键词: 集成光学; 光波导放大器; 制作工艺; 波导结构

中图分类号: TN722 文献标识码: A

Review of the new development of optical waveguide amplifier

SU Jie-mei, DAI Ji-zhi, YANG Ya-pei

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: The new developments of optical waveguide amplifier are summarized. Amplifiers with different structures, different fabricating methods and different material are described.

Key words: integrated optics; optical waveguide amplifier; fabricating method; waveguide structure

引 言

光波导放大器是 90 年代初出现的又一种新型光放大器, 与光纤放大器相比, 光波导放大器具有以下优点: 制造成本低、单位长度增益高、结构紧凑、易于与其它光学器件集成、可以在同一衬底上提供无源和有源光路。基于以上优点, 掺铒光波导放大器(EDWA)可望在光通信和集成光学领域得到广泛应用。2001 年开始出现了商用化掺铒波导光放大器。

近年来, 全光通信网络的飞速发展和超长距离的传输, 对光波导放大器提出了更高的要求。目前的波导放大器研制正朝着更高的增益、更宽的带宽、更高的传输功率和更高的集成度等目标迈进。下面对光波导放大器的发展状况做一个比较系统的介绍。包括光波导放大器材料研制, 器件制作以及器件结构、应用。

1 光波导放大器用放大材料的研究状况

光波导放大器的激光介质是有源波导, 是在普通光波导中掺入稀土元素, 使原来无活性的波导变为有活性的波导, 即有源波导。稀土元素即元素周

期表中的镧系元素, 由于独特的原子结构, 使得它们具有独特的光谱特性。掺稀土元素的激光材料跃迁, 产生非常尖锐的激光线型, 适合做为光放大器的材料。铒离子、钕离子和镨离子的一些能级跃迁所发出的光子频率刚好和光通信使用的光频率相同, 因此得到了广泛应用。

1.1 掺铒材料

图 1 为 Er^{3+} 的能级图。由图可见, 电子跃迁发出的 1540nm 波长, 处于光通信的 1550nm 低损耗窗口; 而 800nm, 980nm 和 1480nm 波长刚好又与半导体抽运激光管的发光波长区吻合。这样, 只要有中等大小的抽运功率就可获得高浓度的粒子数反转。

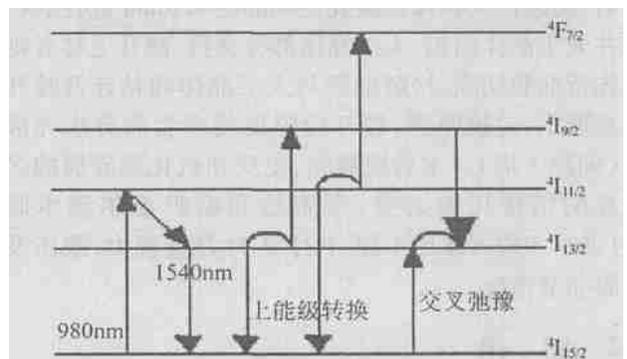


图 1 Er^{3+} 能级结构和跃迁情况

由于铒离子的能级特点, 使得掺铒材料得到了广泛研究, 并应用于实际器件制造中。表 1 中给出近年来掺铒材料的研究进展。

作者简介: 苏洁梅(1978), 女, 硕士, 从事光放大器和电磁计算方面的研究工作。

E-mail: sujie mei@sina.com

收稿日期: 2003 10 20; 收到修改稿日期: 2004 04 07

表 1 不同基质材料的单位增益

材料	制作工艺	Er ³⁺ 质量分数 / %	增益 /(dB·cm ⁻¹)
phosphosilicate	PECVD	0.48	0.67
P ₂ O ₅ /SiO ₂	FHD	0.77	0.68
Al ₂ O ₃	ionr implant	1.5 × 10 ²⁶ /(ions·m ⁻³)	0.75
Y ₂ O ₃	sputtering	0.34	1.3
Al ₂ O ₃ /P ₂ O ₅ SiO ₂	sol gel	1.17	1.35
silicate	ionr exchange	0.25	2.3
phosphate	ionr exchange	2	3.3
phosphate	sputtering	1.65	4.1
soda lime	sputtering	2.0 × 10 ²⁶ /(ions·m ⁻³)	4.2

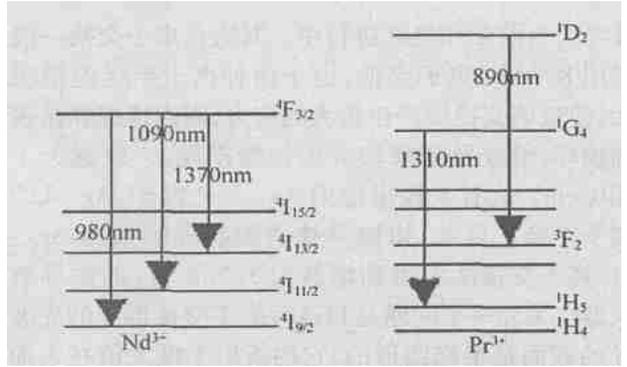
试验证明,当掺杂玻璃中的 Er³⁺ 质量分数增大时,会引起铒离子之间的交叉弛豫,使铒离子亚稳态的寿命缩短。这种效应使掺杂质量分数的提高受到了限制。解决这种限制的方法是在掺铒玻璃中掺入一些 Al₂O₃ 或者 Yb³⁺ 离子,使得 Er³⁺ 的分布均匀。同时, Yb 离子在 980nm 波长附近有很强的吸收截面,可以作为抽运吸收敏化剂,负责将吸收的抽运光能量转移给 Er 离子,提高抽运效率。波导的基片常用硅酸盐玻璃或磷酸盐玻璃。它们能够接受非常高的 Er³⁺、Yb³⁺ 掺杂离子数浓度(超过 10²⁶ ions/m³,比硅玻璃高 100 倍)。同时制作出的波导损耗相对较小。有报道称,氟铝酸盐玻璃具有更大的荧光强度和较小的浓度猝灭效应^[1],但是尚未见氟铝酸盐玻璃制作光波导放大器的文章。

1.2 掺铒与掺镨材料

掺铒玻璃只能在 1550nm 波段提供光放大。1300nm 波长是目前大量铺设的光纤系统的通信窗口,故研究和发展 1300nm 波段的放大器材料,对提高现有光纤通信系统的能力具有非常重要的意义。

人们很早就发现,掺铒材料在 1300nm 波段显示出受激放大的能力。但因为 1050nm 波长处具有很强的自发辐射,在 1300nm 波长附近具有很强的激发态吸收,因而掺铒材料的作为放大介质受到了限制。近年来研究发现,一种新的掺镨材料也具有受激放大 1300nm 波长光信号的能力,并具有宽带,高增益放大特性,因此更具有吸引力。Nd³⁺ 和 Pr³⁺ 的能级结构和跃迁情况如图 2 所示。

掺镨材料做成波导放大器的主要困难在于放大

图 2 Nd³⁺ 和 Pr³⁺ 的能级结构和跃迁情况

效率低,需要很好的抽运功率。在掺镨的 SiO₂ 玻璃中,能级差较小而其非辐射性衰落速率较高,使得在 1300nm 波长处放大效率较低。因此,为了实现 1300nm 波长的光放大,应寻求新的玻璃基质。InF₄ 氟化物玻璃、混合卤化物玻璃、硫化物玻璃都是非常好的选择。但这些基质材料的特性尚需要进一步研究。目前掺镨光波导放大器对 1054nm 的信号光进行放大,其抽运功率为 346mW,抽运波长 514nm,可得到 1.5dB/cm 的增益^[2]。而掺镨光波导器对 1.064μm 信号光进行放大,可得到 8.6dB 的增益(Pr 掺杂离子数浓度为 1.06 × 10²⁶ ions/m³,波导长度 2.2cm)^[3]。

2 光波导制作工艺

光波导放大器的制作涉及到化学工艺、真空工艺、半导体工艺等。最关键的是具有特定参数的光波导的形成。光波导的制作方法主要有火焰水解法(FDH)、离子注入法(ionr implanted)、RF 溅射/化学气相沉淀法(CVD)、离子交换法(ionr exchanged)、溶胶凝胶法(sol gel)和复合波导技术。目前常用方法是离子交换法,相对其它方法而言,离子交换法工艺简单、成本低,应用最多也最成熟。而近年来,热压粘结法和溶胶凝胶法由于各自的优点,也受到人们的关注。

2.1 离子交换法

用离子交换法在氧化物玻璃基片上制作出的波导掩埋于玻璃表面下,这样可以保证波导稳定并使其性能得到优化,这种波导具有更低的传输损耗和偏振相关性,可以支持限定的模式,且能够很好地与光纤兼容。

在离子交换法中存在几个问题。一个是光刻制备掩模过程对玻璃表面的破坏,尤其是去掉铝膜所用的腐蚀液,会严重破坏玻璃表面,使制备的条形波导具有很大的传输损耗。选择适当的金属掩模以及对玻璃无损的腐蚀液,可得到光学性质更好的条形

波导。目前工作还在进行中。其次是离子交换一般采用 $K^+ - Na^+$ 离子交换, 由于两种离子半径差别很大, 使玻璃交换层产生较大的应力, 因而造成样品表面损坏, 给波导带来较大的传输损耗, 一般远大于 1dB/cm 。故有人提出使用 $Ag^+ - Na^+$ 离子、 $Ag^+ - Li^+$ 离子交换。目前, 铟镱共掺磷酸盐玻璃采用 $Ag^+ - Li^+$ 离子交换法可得到增益为 3.3dB/cm 的波导放大器。另外一个问题是只进行离子交换形成的光波导的截面是半椭圆形的, 它的折射率极大值在表面处, 为非对称分布。这种波导稳定性较差, 且在与折射率对称分布的光纤进行对接耦合时, 二者会因模场失配而造成较高的耦合损耗, 这会大大影响 EDWA 的实际应用, 故需要对其进行再处理。若在制作波导的玻璃表面与另一表面之间加适量电场时, 由离子交换形成的波导会向玻璃内部整体移动, 从而形成折射率极大值位于中心的对称分布掩埋型玻璃波导。这种方法称为电场辅助热扩散型离子交换法 (field assisted ionr exchanged, FAIE), 如图 3 所示。

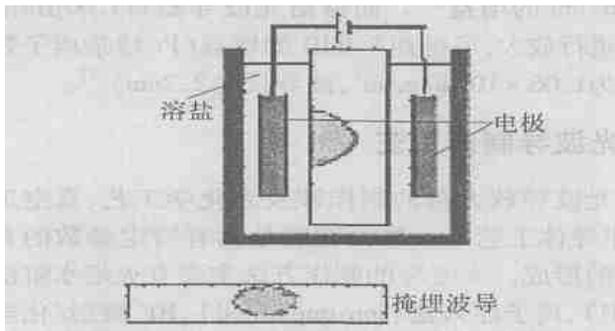


图 3 电场辅助离子交换

2.2 热压粘结法

随着光通信的发展, 光器件的集成需求越来越高。人们开始探索在同一基片上同时制作有源和无源器件。如下面将提到的合/分波集成光波导放大器, 需要在掺杂区对光信号进行放大, 在非掺杂区对光信号进行分/合。热压粘结法是一个很好的解决方法^[4]。

粘结实质上是具有相近热膨胀系数的材料界面润饰过程。润饰与粘附层的亲和力有关, 亲和性越大, 粘附性越好。同类或相近化学键的物质相互粘合, 因而容易粘结。

2.3 溶胶-凝胶法

由于波导放大器有源区长度非常短, 需要在有源区重掺杂稀土离子。重掺杂带来了稀土离子聚集的问题。目前可以通过掺锗/铝来避免离子聚集问题。然而当前的光器件普遍采用光纤尾纤, 因此, 人们希望放大器的基质材料也是硅玻璃, 以提高集成

效率。前面提到的工艺方法都不能有效解决硅玻璃中离子聚集问题。而溶胶-凝胶法可以很好地解决这一问题。同时溶胶-凝胶法在制作低成本集成光学和电子器件等方面有巨大的潜力。正是因为这些特点, 掺杂溶胶-凝胶工艺受到了人们的重视。

溶胶-凝胶法的基本原理是: 将金属醇盐或无机盐经水解直接形成溶胶或经解凝形成溶胶(高分子和微粒分散的胶体), 然后使溶质聚合凝胶化, 再将凝胶干燥, 焙烧, 去除有机成分, 最后得到无机材料。用溶胶-凝胶法制备过程如下: 选用适宜的基底材料, 浸入到配制好的溶胶中, 利用物理或化学的作用, 在基底材料表面获得功能化的膜, 重复此过程, 可获得多层膜, 最后经过干燥、煅烧处理即可。图 4 是掺铟硅酸盐玻璃的溶胶的制备过程^[5]。



图 4 掺铟磷酸盐溶胶的制备过程

将合成的先体溶液在超净环境中甩膜, 所用基片为 Si 或 SiO_2 。湿膜用甩胶机以 2000r/min 的旋转速度获得, 然后立即放入快速热处理炉内, 热处理条件为 400°C 。重复以上过程, 得到掺铟薄膜。经过干燥处理后, 用蚀刻法将薄膜制成条形波导, 使用 PECVD 法(气相沉淀法)在条形波导表面沉淀十几

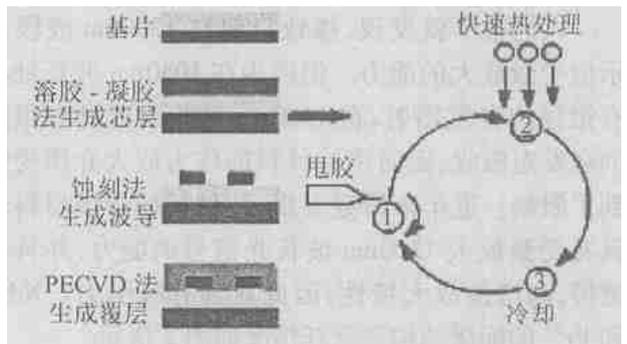


图 5 溶胶-凝胶法制备掺铟波导放大器

微米厚的硼磷硅酸盐玻璃(borophosphosilicate)覆层,由此得到掩埋型波导。工艺流程如图 5 所示。

使用溶胶-凝胶法制备光波导已有报道。而使用凝胶-溶胶法制备光波导放大器直到 1999 年才获得成功。目前可在 5cm 长的有源区获得 6dB 增益^[6]。

3 新型结构的光波导放大器

3.1 弯曲光波导放大器

在发展高增益器件时,直波导放大器受材料本身特性和集成要求的限制,增益难以做得更高。增加有源波导长度,是提高波导放大器增益的有效途径。然而,为了减少集成体积,波导长度一般限制在 5cm~10cm。并且在制作平面集成光路(PLC)中,为了解决上述问题,有源放大区有时候需要弯曲。为了解决上述问题,人们提出了一种新型结构的光波导放大器——弯曲波导放大器,如图 6 所示。

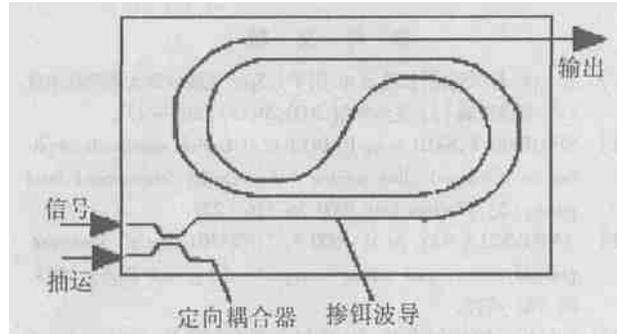


图 6 弯曲光波导放大器

这种结构可在有限的尺寸中大大增加有源波导长度,从而提高增益,目前已有弯曲波导放大器成品报道,其模块可以在 1535nm 波长窗口获得 27dB 的增益,面积只有 79mm×35mm,波导长度为 47.7cm,基质材料为硅酸盐玻璃。而目前最小的直波导放大器模块可以在 1535nm 波长窗口获得 15dB 增益,其面积为 130mm×11mm。

在任何介质波导中,只要有弯曲就有辐射损耗,而且弯曲光波导放大器中的抽运和信号光的横向场在弯曲部分被破坏,两场的重叠因子发生改变。因此必须考虑如何减少弯曲损耗。解决这一问题的有效途径是分支补偿法(lateral offsets)^[7]。

结构优化的另一个任务是在尽量小的面积内,有充分长的波导长度。当波导弯曲半径小于某一个值时,传输损耗迅速增大。当波导弯曲半径 $R=5\text{mm}$ 时,无源波导辐射损耗为 0.0909dB/cm。而 $R=4.5\text{mm}$ 时,无源波导辐射损耗为 0.3421dB/cm。试验结果表明,最佳的波导结构应包括直波导和螺旋状的波导^[8],如图 7 所示。图 7b 是图 7a 的结构

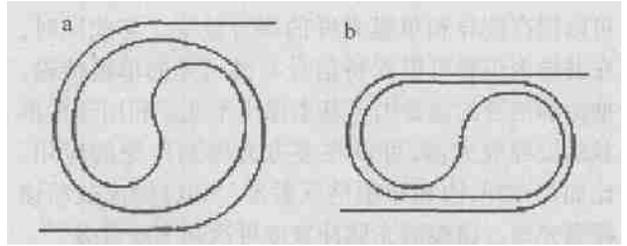


图 7 a—结构未优化前的波导 b—结构优化后的波导

改进。在输入和输出部分,延长了直波导的长度。最小弯曲半径也得到增大。利用线性法(method of line)对图形进行仿真,可以看到,优化后的波导增益得到改善。如表 2 所示。可见,只使用直波导结构无法在 11mm 的长度上实现如此高的增益。

表 2 优化前后弯曲波导增益特性比较

结构	最小半径 / mm	基片宽度 / mm	基片长度 / mm	基片面积 / mm ²	增益 / dB
图 7a	3.69	15.98	15.88	253.7	7.11
图 7b	5.15	21.59	11.39	146.0	9.28

3.2 合/分波集成波导放大器

这种放大器可以将单根光纤输入的信号放大,分路后耦合到多路光纤输出,也可以将几路光信号合路后再放大,然后输出到单根光纤。这种放大器典型结构有 1×4, 1×8 型合/分波集成波导放大器。如图 8 所示。

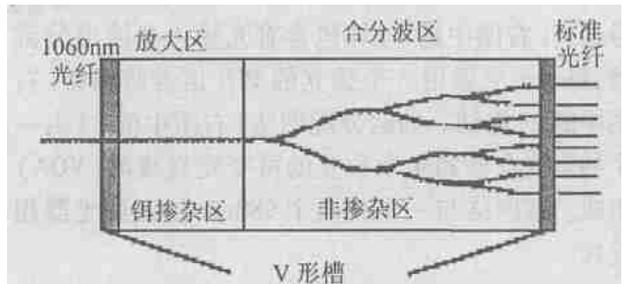


图 8 合/分波集成光波导放大器

合/分波波导放大器是将两种不同功能的玻璃器件粘合在一起制成的。有源放大区采用掺铒磷酸盐玻璃,使光信号增益最大。无源部分采用不掺杂的硅酸盐玻璃,使损耗最小。据报道,粘合损耗小于 0.3dB。目前这种放大器小信号增益可达 10dB,噪声指数小于 5dB。小信号(-10dBm)无损带宽为 15nm,大信号(0dBm)无损带宽为 6nm^[9]。

可以预见,随着工艺水平的发展,以后两种不同功能的玻璃器件将可以在同一玻璃衬底上完成,这样,可以大大减少波导之间的耦合损耗,同时提高器件的稳定性。

3.3 锥形光波导放大器

锥形波导的锥形区长度为 2mm,宽度从 6.5μm

渐变到 $9\mu\text{m}$, 如图 9 所示。这种形状的波导放大器可以提高波导和单模光纤的耦合效率。与此同时, 在波导内仍然可以保持信号与抽运光的单模传输, 抽运和信号的重叠因子基本保持不变。利用这种形状的波导放大器, 可以在多方面得到广泛的应用。比如与光纤、饱和布喇格反射器(SBR)构成被动锁模激光器。锁模激光脉冲宽度可达到飞秒量级^[10]。

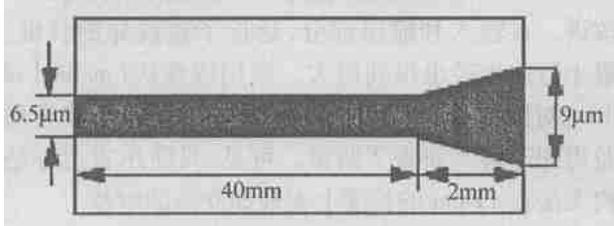


图 9 锥形光波导放大器

3.4 EDWA 阵列

EDWA 本身的特点, 使得 EDWA 可以作为平面集成光路(PLC)的内部部件。美国 Inplane 光子公司在 OFC2003 上宣布新的城域网 EDWA 放大器产品^[11]。产品采用抽运光共享的方式, 集成了 4 个 EDWA, 每个放大器可以独立地控制光增益大小, 在 $9\text{mm} \times 25\text{mm}$ 大小的 PLC (平面光波回路) 芯片上集成了包括分路器、波分复用器、可变光衰减器、抽运光带阻滤波器及光监控抽头等 32 种功能光路。

如图 10 所示, 左图为 EDWA 阵列 PLC。4 条信号通道(右图中的 1)均包含有光输入和输出分流器, 每个分流器由一个独立的 PIN 信道监测器(右图中的 2)终结。抽运分配网络(右图中的 3)由一个抽运混合器和 4 个独立的可变光衰减器(VOA)组成。该网络与一个或两个 980nm 抽运激光器相连接。

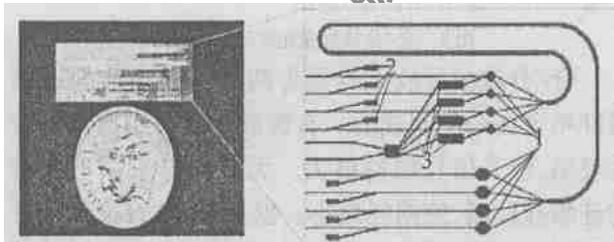


图 10 EDWA 阵列 PLC

采用抽运分配网络使得几个放大器同时使用一个抽运激光器, 这样可降低单个放大器的成本。VOA 可以用来控制抽运激光器发射的抽运能量以及最终耦合到每一个掺铒波导中的抽运能量。抽运光通过 VOA 后, 由 4 个粗波分复用耦合器和信号光耦合在仪器, 之后抽运光和信号光通过 4 个掺铒波导, 信号光得到放大。

EDWA 阵列可应用于包括于接收机、发射机以

及线路放大器内。这些应用适用于不同的网络, 如 10Gbit/s 城域网、城域核心网、未来的 40Gbit/s 城域网。EDWA 阵列的其它应用包括光分插复用器的信道均衡, 波分复用器和解复用器的前置和后置功率放大, 以及交换矩阵的损耗补偿等等。

4 未来光波导放大器研究内容和主要发展方向

未来光波导放大器的设计与创新将比原来的研制更为严格。一方面, 为了满足信息量的传输, 光波导放大器需要更宽的带宽来实现多信道的光放大, 更高的功率放大来实现超常距离的信号传输, 因此, 单位长度高增益、宽带宽材料的进一步研究成为重点。另外一个方面, 由于工程的需要, 光波导放大器的设计将向集成化器件方面发展。新的集成光学工艺的探索和研究也将继续进行。

参 考 文 献

- [1] 张 龙, 林凤英, 祈长鸿 *et al.* 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): 6165~ 6173.
- [2] SIKORSKI Y, SAID A A, BADO P *et al.* Optical waveguide amplifier in Nd doped glass written with near IR femtosecond laser pulses [J]. Electron Lett, 2000, 36: 226~ 227.
- [3] ANTONELLA D O, de MARCO S, LUCIANO M *et al.* Design of praseodymium doped optical waveguides [J]. Opt Engng, 2003, 42: 765~ 772.
- [4] GRAF J, SAUTTER H, MUELLER-FIEDLER R. Erbium doped waveguide amplifier in glass fabricated by a hot pressing technology [A]. Conference on Lasers and Electro Optics Europe-Technical Digest [C]. New York: IEEE Lasers and Electro Optics Society, 1998. 263.
- [5] HUANG W, SYMS R R A, YEATMAN E M *et al.* Fiber device fiber gain from a soft gel erbium amplifier [J]. IEEE Photon Technol, 2003, 14: 959~ 961.
- [6] HUANG W, SYMS R R A. Soft gel silica on silicon buried channel EDWA [J]. J Lightwave Technol, 2003, 21: 1339~ 1349.
- [7] KITOH T, HUANG Y T. Bending loss reduction in silica based waveguides by using lateral offset [J]. J Lightwave Technol, 1995, 13: 555~ 562.
- [8] LOWE D, SYMS R R A, HUANG W B. Layout optimization for Erbium doped waveguide amplifiers [J]. J Lightwave Technol, 2002, 20: 454~ 462.
- [9] JAOUEN Y, de LAURENT M, DENIS B *et al.* Eight-wavelength Er-Yb doped amplifier combiner/splitter planar integrated module [J]. IEEE Technol Lett, 1999, 11: 1105~ 1107.
- [10] ROTH J M, BERGMAN K, BARBIER D *et al.* Passive harmonically modelocked fiber laser using a tapered Er/Yb waveguide amplifier and a saturable Bragg reflector [A]. IEEE Nonlinear Opt Mater Fundam Appl Conf Proc [C]. New York: IEEE, 2000. 313~ 315.
- [11] FROLOV S V, SHEN T M, BRUCE A J. EDWA: key enabler of optical integration on PLC [J]. SPIE, 2003, 4990: 47~ 54.