

硅基二氧化硅阵列波导光栅制作工艺的研究

郎婷婷¹ 林旭峰² 何建军²

(¹中国计量学院光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018
²浙江大学现代光学仪器重点实验室集成光电子中心, 浙江 杭州 310027)

摘要 硅基二氧化硅阵列波导光栅是集成化波分复用光网络中的核心器件之一。对其制作工艺的研究对提高器件的性能具有重大意义。提出一种在波导上包层使用硼锗共掺高温退火的工艺方法, 成功实现阵列波导间空隙的填充, 并将阵列波导光栅的插入损耗成功降低约 2 dB。相对于传统的硼磷硅玻璃工艺, 此方法避免了剧毒气体磷烷的使用, 工艺简便安全, 同时降低了成本。最后, 通过对光刻、增强型等离子体化学气相沉积法(PECVD)薄膜沉积、感应耦合等离子体(ICP)干法刻蚀和高温退火回流等工艺步骤的改进、完善和优化, 实现了额外损耗约为 1.5 dB 的阵列波导光栅。

关键词 集成光学; 平面光波导器件; 硼锗共掺高温退火; 阵列波导光栅; 硅基二氧化硅光波导

中图分类号 TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0213003

Fabrication of Silica-on-Silicon Arrayed Waveguide Gratings

Lang Tingting¹ Lin Xufeng² He Jianjun²

¹College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

²Centre for Integrated Optoelectronics, State Key Laboratory for Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract The arrayed waveguide grating is one of the key devices in integrated wavelength division multiplexing optical networks. In order to realize high performance arrayed waveguide gratings, it is essential to optimize the fabrication process of silica-on-silicon planar optical waveguides. A new process for filling the gaps of plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) silica waveguides using boron-germanium co-doped upper-cladding and high-temperature annealing is proposed. And the measured transmission loss of an arrayed waveguide grating is reduced by about 2 dB. By reason of avoiding the use of toxic phosphine, the proposed method has potential advantages compared with the commonly used borophosphosilicate glass (BPSG) processing. Every step of fabrication, such as photolithography, PECVD, inductively coupled plasma (ICP) and high-temperature thermal annealing, is modified and improved. The excess loss of fabricated arrayed waveguide grating is about 1.5 dB.

Key words integrated optics; optical waveguide devices; boron-germanium co-doping and high-temperature annealing; arrayed waveguide grating; silica-on-silicon waveguide

OCIS codes 130.0130; 130.2755; 130.2790; 130.7408

1 引 言

阵列波导光栅(AWG)具有平面光波导器件的所有优点。经过二十多年的发展, AWG 的各方面性能不断得到改进, 日臻完善。尽管 AWG 器件目前已经广泛商用, 但国内外(尤其是日本)对 AWG 设计和工艺的改进及其相应的物理基础研究和应用

拓展研究仍十分活跃^[1~3]。近年来, 随着光纤到户光网络的快速推进, 基于阵列波导光栅的单纤三向波分复用器被提出^[4]。AWG 在波分复用无源光网络(WDM-PON)中的应用也日趋重要^[5]。

对于平面光波导集成器件而言, 工艺误差将导致器件性能偏离理论设计值。工艺水平的高低直接

收稿日期: 2010-06-17; 收到修改稿日期: 2010-08-16

基金项目: 国家自然科学基金(60788403, 60807018)资助课题。

作者简介: 郎婷婷(1981—), 女, 博士, 讲师, 主要从事集成光学, 平面光波导器件和无源器件等方面的研究。

E-mail: langtingting@cjlu.edu.cn

影响了器件的性能。硅基二氧化硅材料是最常用的平面光波导器件制作材料之一,其制作工艺的研究和改进对实现高性能的 AWG 具有重大意义。

本文提出在增强型等离子体化学气相沉积法(PECVD)沉积的二氧化硅波导上包层使用硼锆共掺高温退火工艺的方法,可以实现和传统硼磷硅玻璃工艺相同的波导间隙填充效果,可以有效减小器件的插损,并得到了实验验证。本文先采用 PECVD^[6,7]生成不掺杂的纯二氧化硅下包层以及掺锆的具有较高折射率的二氧化硅芯层;接着,通过光刻、应感耦合等离子体(ICP)干法刻蚀^[8]形成波导结构;再利用 PECVD 沉积掺杂硼、锆的二氧化硅上包层;最后将整片高温退火完成器件的制备。本文提出的硼锆共掺高温退火工艺,相对于传统的上包层掺硼和磷(BPSG)工艺,可避免剧毒气体磷烷的使用,简便安全同时节约了成本。另外,不掺磷烷可减少二氧化硅薄膜的吸潮,提高器件的整体稳定性^[9]。另一方面,由于波导上包层掺锆,提升了二氧化硅薄膜的光敏性能,可用于实现布拉格光栅类器件。

2 实验过程与分析

2.1 下包层和芯层的生长

二氧化硅薄膜的沉积采用 PECVD 方法,设备为英国 STS 公司的 Multiplex。首先,使用硅烷(SiH_4)及笑气(N_2O)[流量分别为 17 sccm(标准状态下 $1 \text{ cm}^3/\text{min}$ 的流量)和 2000 sccm],于较低温度(上下电极温度分别为 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $250 \text{ }^\circ\text{C}$)在硅基底表

面沉积非掺杂二氧化硅薄膜作为波导下包层。反应压强为 4758 Pa,射频源输出功率为 700 W。用棱镜耦合仪(Metricon model 2010)测量薄膜在 1547 nm 波长下的厚度与折射率。非掺杂二氧化硅薄膜的平均折射率为 1.455,沉积速率为 $170 \text{ nm}/\text{min}$,折射率非均匀性为 0.04%,厚度的非均匀性为 5%。

沉积波导芯层时,除了硅烷和笑气外,需添加锆烷(GeH_4)来提高波导芯层的折射率,锆烷流量为 3 sccm。掺锆二氧化硅薄膜平均折射率为 1.4675,沉积速率为 $200 \text{ nm}/\text{min}$,折射率的非均匀性为 0.05%,厚度的非均匀性为 6%,芯层和包层的折射率差 $\Delta \approx 0.85\%$ 。

2.2 光 刻

通过光刻工艺可将掩膜图形转移到新制备的二氧化硅薄膜上,由于环境因素对光刻效果有影响,所以整个工艺过程需保证环境湿度低于 40%,温度 $20 \text{ }^\circ\text{C} \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ 下进行。实验中采用 SPR 220-3.0 光刻胶,根据后续刻蚀工艺要求的掩膜厚度,将匀胶机转速确定为前 3 s 为 $900 \text{ r}/\text{min}$,后 29 s 为 $4000 \text{ r}/\text{min}$,此时光刻胶厚度约为 $3.8 \text{ }\mu\text{m}$ 。对准曝光采用的是 SUSS Micro Tec. 公司的 MA/BA6 光刻机,曝光功率 $9.8 \text{ mW}/\text{cm}^2$,曝光时间 20 s,真空压力 0.01 MPa 。图 1(a)是用扫描电子显微镜(SEM)观察到的宽度为 $6 \text{ }\mu\text{m}$,高度 $4 \text{ }\mu\text{m}$ 的光刻胶图形,侧壁垂直度约为 85° 。图 1(b)是在 2×10^4 倍放大倍率下观察到的光刻胶侧壁形貌,可以看到侧壁较光滑,粗糙度小。

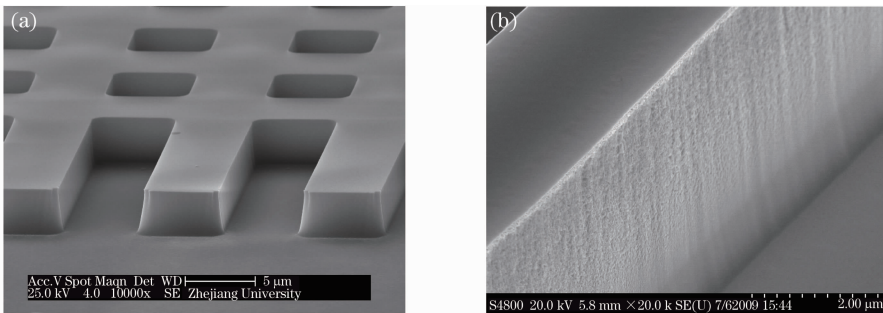


图 1 光刻胶形貌的 SEM 照片。(a)线宽 $6 \text{ }\mu\text{m}$,高 $4 \text{ }\mu\text{m}$ 的光刻胶整体,(b)侧壁形貌

Fig. 1 SEM pictures of the photoresist. (a) the width of the photoresist is $6 \text{ }\mu\text{m}$, the height is $4 \text{ }\mu\text{m}$, (b) the lateral wall

2.3 ICP 干法刻蚀

二氧化硅波导的刻蚀采用 ICP 方法,设备型号是英国 STS 公司的 Multiplex ICP。在 ICP 刻蚀工艺中,有很多控制参数制约刻蚀的效果,包括线圈功率、偏压功率、气体选用与搭配、反应气体流量和比例以及反应腔的真空度等。参数的选择在增加了 ICP 刻蚀工艺调整的灵活性的同时,也使得工艺调

整复杂。使用的设备有四组气路,分别是 CF_4 , O_2 , Ar 和 CHF_3 。二氧化硅薄膜的刻蚀是靠氟碳化物气体来进行,依照碳/氟(C/F)比模型理论建立工艺。在 CF_4 中加入适量氢可以提高 SiO_2 与光刻胶的刻蚀选择比,还可以通过 H 来调整 F/C 比。表 1 和图 2 给出了尝试的部分刻蚀配方以及相应的刻蚀结果。

表 1 不同刻蚀配方的比较

Table 1 Comparison of different etching formula

No.	Vacuum degree /mT	Coil power /W	Platen power /W	O ₂ /sccm	CHF ₃ /sccm	CF ₄ /sccm
(a)	5	800	35	15	30	30
(b)	5	800	40	0	50	6
(c)	5	800	50	30	50	0
(d)	5	800	50	0	50	6
(e)	5	800	40	7	50	0
(f)	5	800	40	5	50	0
(g)	3	800	50	0	50	6

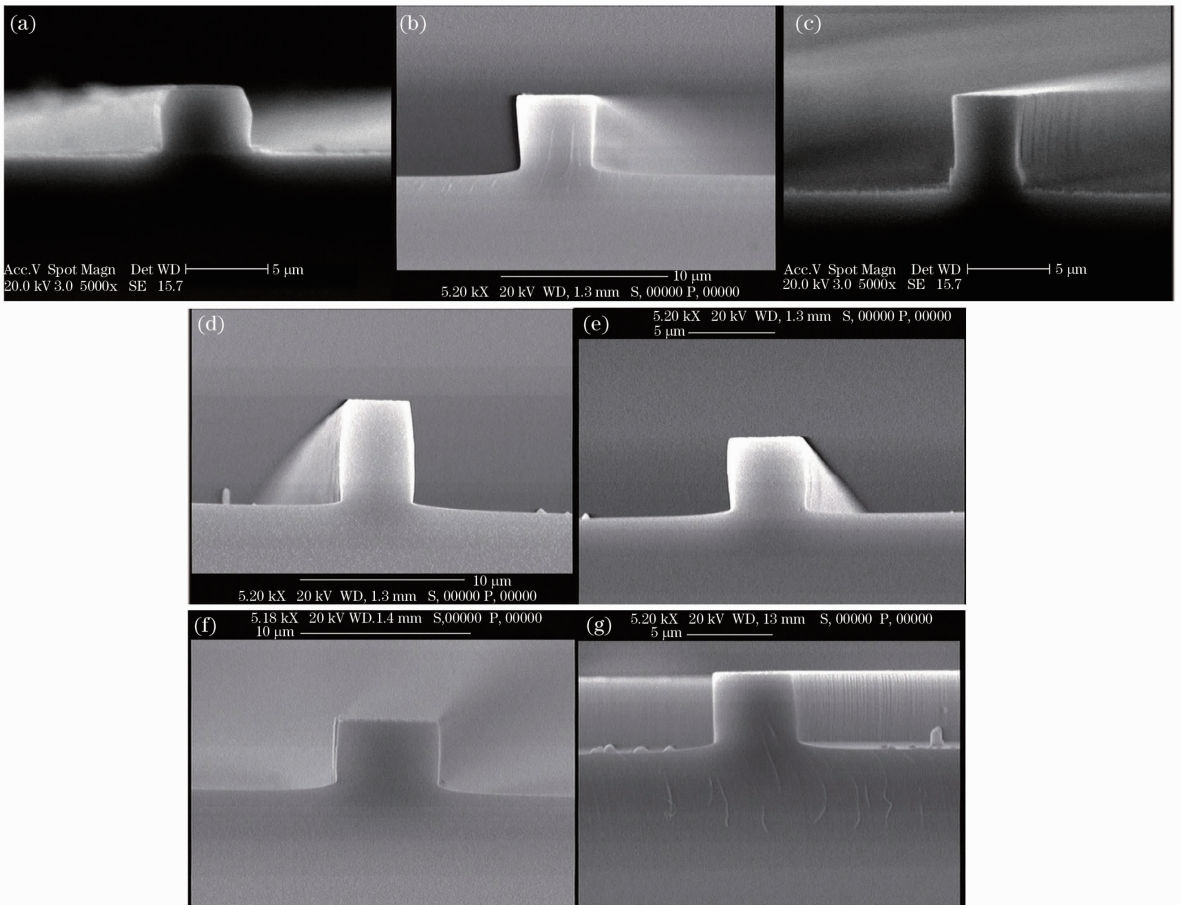


图 2 用表 1 中相应刻蚀配方得到的波导横截面的 SEM 照片

Fig. 2 SEM cross-sectional images of waveguide using different etching formula in Table 1

良好的刻蚀形貌对光波导器件非常重要。经过多次实验,发现反应腔的真空度和下电极的偏压功率对刻蚀地貌的陡直度影响最大。当真空度升高,即压强降低时,等离子体的平均自由程增大,减少了散射碰撞,因此提高了带电离子轰击基片表面的方向性。另外,增加偏压功率也可以提高离子轰击的方向性。最终选择的刻蚀配方是表 1 的最后一个配方(g),侧壁相对最垂直。

用优化后的配方刻蚀 35 min,刻蚀深度约为 $6.88 \mu\text{m}$,刻蚀速率 197 nm/min 。最终得到的波导

横截面如图 3(a)所示,这次是用整片硅片刻蚀,长完上包层后解理观察到的端面图片。可以看到,在 9×10^3 倍放大倍率下观察,波导端面仍是有一些正梯形。侧壁的陡直度约为 85° 。

对于光波导器件来说,除了材料本身的吸收,ICP 刻蚀后光波导侧壁的粗糙度引起的光散射也是造成传输损耗的主要因素^[10]。图 3(b)是用优化后的配方刻蚀得到的侧壁粗糙度的 SEM 照片,放大倍率为 2×10^4 倍。可以看到,侧壁比较光滑。

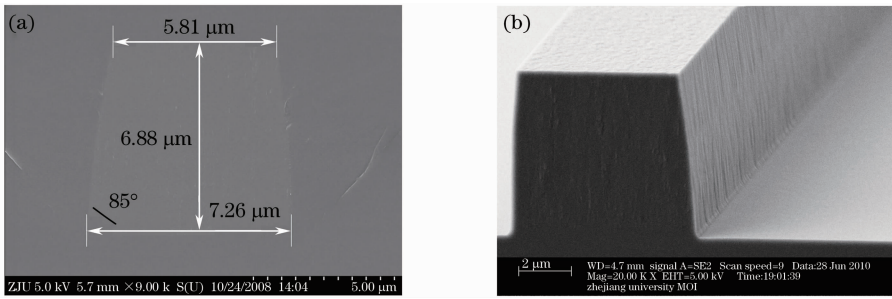


图 3 用优化后的刻蚀配方刻蚀后得到的(a)波导横截面和(b)侧壁粗糙度的 SEM 照片
Fig. 3 SEM picture of (a) cross section of waveguides and (b) lateral wall roughness

2.4 硼锆共掺高温退火

用 PECVD 方法生长二氧化硅波导光栅时,由于阵列波导间距较小,自影闭效应会由于上包层提早封闭而产生无法填充的空隙,会极大地影响 AWG 的各项性能,特别是插入损耗。目前,国内外常用的一种解决方法是 BPSG^[11,12]。掺杂后上包层的熔点低于芯层和下包层,因此可以通过高温退火,使近似液态的上包层回流填充空隙。但这种方法必须使用剧毒气体磷烷,并且由于磷的加入,会使得二氧化硅薄膜易于吸潮,影响器件的稳定性^[13]。IBM 在 1992 年提出通过周期性沉积及氩气溅射刻蚀的方法实现 PECVD 沉积导致空隙的填充^[14],但是这样做会在波导间形成致密度较低的区域,而且工艺复杂。另一种不太寻常的技术是用高温退火的方法来软化波导的芯层材料,使芯层结构由初始的正方形变为近似圆形,避免了上包层的提早闭合,从而实现波导间隙的有效填充^[14]。但很明显芯层结构的改变会对光波导器件的性能造成不利影响。

掺硼会使二氧化硅薄膜折射率降低,掺锆会使折射率升高,同时掺杂浓度的提高又会降低上包层的熔融温度。由此,提出一个相对简单的方法解决空隙填充问题,利用硼锆共掺沉积二氧化硅上包层以使上包层熔点低于芯层材料,然后进行高温退火回流减弱自影闭效应。上/下包层折射率相等的要求可通过掺杂量的调整来实现。这种硼锆共掺高温退火工艺,可以得到和传统的 BPSG 工艺同样的效果,但避免了剧毒气体磷烷的使用,从而更加简便安全,节约了成本。同时,不掺磷烷可减少二氧化硅薄膜的吸潮,提高器件的整体稳定性^[9]。另一方面,由于波导上包层掺锆,提升了二氧化硅薄膜的光敏性能,可用于实现布拉格光栅类器件。

采用的退火工艺是以 10 °C/min 的速度升温至预定退火温度,恒温 15 min 后自然降温。相对较短的退火时间可减弱不同层之间的杂质扩散作用,但

退火仍会同时对波导的下包层和芯层造成一定影响^[15],引起它们的折射率变化,所以必须考虑这两者退火后的折射率变化。根据波导的光传输特性,须保证上/下包层退火后的折射率相等,同时包层和芯层的折射率差为 $\Delta \approx 0.85\%$ 。图 4 是上/下包层退火后的折射率。图中非掺杂下包层和硼锆共掺上包层的折射率曲线恰好在虚线圈出处重合,折射率都为 1.445。由此确定了上包层的掺杂条件为 B_2H_6 流量为 3 sccm, GeH_4 流量为 0.5 sccm,退火温度为 900 °C。

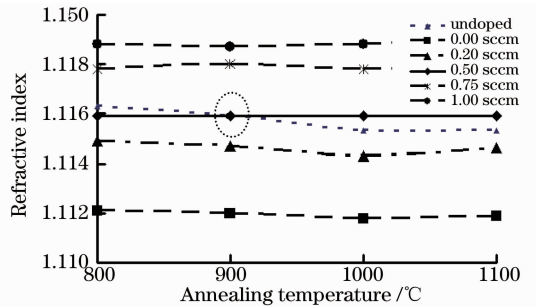


图 4 非掺杂二氧化硅和硼、锆共掺二氧化硅退火后的折射率曲线

Fig. 4 Refractive index of B-Ge co-doped upper cladding and undoped silica film after annealing

接着,还要考虑退火对波导芯层的影响。根据退火后包层折射率 $n = 1.4459$,以及折射率差 $\Delta \approx 0.85\%$,要求芯层折射率为 $n = 1.457$ 。图 5 是不同

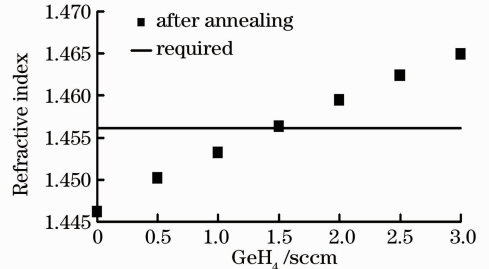


图 5 波导芯层退火后折射率随锆烷流量的变化
Fig. 5 Refractive index of the waveguide core after annealing versus

锗烷流量下, 900 °C 退火后波导芯层的折射率。如图所示, 锗烷流量为 1.5 sccm 时满足折射率要求。

图 6 是用 SEM 观察到的 900 °C 退火前后波导的横截面照片。退火前, 观察倍率为 2×10^3 倍, 此时已经可以在两根波导之间明显观察到空隙的存在。

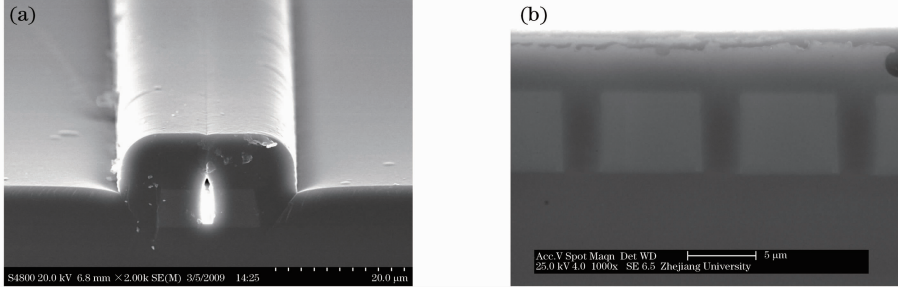


图 6 波导横截面的 SEM 照片。(a)900 °C 退火前和(b)退火后

Fig. 6 SEM cross-sectional images of waveguide. (a) before and (b) after annealing at 900 °C

3 实验结果与讨论

在用上述工艺制作完成整片基片后。采用截断法测量直波导的传输损耗。设波导单位长度损耗为 α , 则总损耗 L_{tot} 与波导长度 l 的关系为 $L_{\text{tot}} = 2L_c + \alpha l$, 其中 L_c 为光纤和直波导的端面耦合损耗。测试得到波导总损耗随波导长度的变化曲线如图 7 所示, 曲线的斜率就是波导的单位长度传输损耗, 约为 0.48 dB/cm。端面耦合损耗约为 0.5 dB。波导侧壁的粗糙度引起的散射损耗是造成较大传输损耗的主要因素。

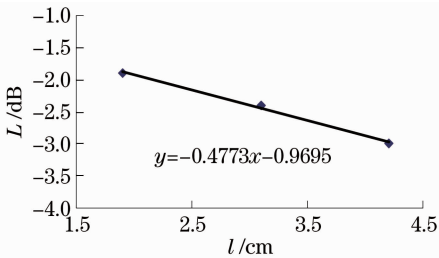


图 7 截断法测试二氧化硅直波导损耗

Fig. 7 Transmission loss of silica straight waveguide by truncation method

根据上述工艺制作了基于 AWG 的三波分复用器, 器件的详细设计过程已在文献[4]中描述。芯片宽度为 1.5 mm, 长度为 17 mm。测试得到如图 8 所示的 AWG 频谱图, 图中的损耗已减去和 AWG 长度相同的参考直波导的损耗, 即去除了端面耦合损耗的影响。图 8 中的实线表示的是使用硼锗共掺高温退火工艺后得到的三通道 AWG 频谱图, AWG 的额外损耗约为 1.5 dB。作为比较, 虚线表示的是在上包层为非掺杂纯二氧化硅和不退火情况下制作

在。900 °C 退火后, 观察倍率为 1×10^4 倍, 可以看到波导间的空隙已经完全被回流的上包层填充, 并且下包层和芯层都没有变形。这说明上包层的熔点低于下包层和芯层。在不影响二氧化硅波导下包层和芯层形貌的情况下成功实现了空隙的填充。

的三通道 AWG 频谱图, AWG 的额外损耗约为 3.5 dB。因此证明硼锗共掺高温退火工艺在填充波导空隙的同时可以降低约 2 dB 的 AWG 的损耗。由于高温退火对材料折射率的影响, 图中 AWG 的峰值波长在退火后向短波方向偏移了约 2 nm。测试得到 AWG 的偏振相关波长偏移小于 0.1 nm, 串扰约为 30 dB。

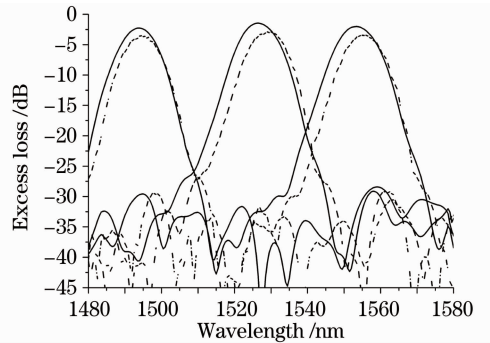


图 8 两种不同工艺条件制作出的三波分复用器频谱图
Fig. 8 Transmission spectra of an AWG triplexer with (solid curves) and without (dashed curves) upper cladding B-Ge co-doping and high-temperature annealing

4 结 论

本文提出一种在波导上包层使用硼锗共掺高温退火的工艺方法, 成功实现波导间空隙的填充, 并将阵列波导光栅的插入损耗成功降低约 2 dB。相对于传统的硼磷硅玻璃工艺, 此方法避免了剧毒气体磷烷的使用, 工艺更加简便安全, 节约了成本, 对器件性能也有较大提高。通过对基于硅基二氧化硅材

料的平面光波导制作工艺,特别是光刻工艺,PECVD薄膜沉积,ICP干法刻蚀和高温退火回流工艺等的详细研究和分析,得到较优化的工艺步骤和配方,实现了额外损耗约为1.5 dB的阵列波导光栅芯片。

参 考 文 献

- 1 Y. Sakamaki, S. Kamei, T. Hashimoto *et al.*. Loss uniformity improvement of arrayed-waveguide grating with mode-field converters designed by wavefront matching method [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(24): 5710~5715
- 2 Huang Jingtang, Huang Xuguang, Zhao Huawei. Quasi-distributed fiber bragg grating sensor using the interrogation of arrayed waveguide grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2067~2071
黄景堂, 黄旭光, 赵华伟. 阵列波导光栅解调的准分布式光纤光栅传感器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2067~2071
- 3 Huang Huamao, Liu Wen, Huang Dexiu. Analytical solutions for the temperature stability of central wavelength in arrayed waveguide gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1725~1729
黄华茂, 刘文, 黄德修. 阵列波导光栅中心波长温度稳定性的研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1725~1729
- 4 T. Lang, J. J. He, S. He. Cross-order arrayed waveguide grating design for triplexers in fiber access networks [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(1): 232~234
- 5 F. Ponzini, F. Cavaliere, G. Berrettini *et al.*. Evolution scenario toward wdm-pon[invited][J]. *J. Opt. Commun. Netw.*, 2009, **1**(4): C25~C34
- 6 G. Grand, J. P. Jadot, H. Denis *et al.*. Low loss PECVD silica channel waveguides for optical communications [J]. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(25): 2135~2137
- 7 Lou Lifang, Sheng Zhongyan, Yao Kuihong *et al.*. PECVD deposition and characterization of thick silica film for optical waveguide [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 24~28
娄丽芳, 盛钟延, 姚奎鸿等. 厚二氧化硅光波导薄膜制备及其特性分析[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1): 24~28
- 8 N. R. Rueger, J. J. Beulens, M. Shaepkens *et al.*. Role of steady state fluorocarbon films in the etching of silicon dioxide using CHF₃ in an inductively coupled plasma reactor [J]. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 1997, **15**(4): 1881~1889
- 9 T. W. Dyer. Moisture instability of borophosphosilicate glass and the effects of thermal treatment [J]. *J. Electron. Chem. Soc.*, 1998, **145**(11): 3950~3956
- 10 F. Grillot, L. Vivien, S. Laval *et al.*. Size influence on the propagation loss induced by sidewall roughness in ultrasmall SOI waveguides [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(7): 1661~1663
- 11 A. Kilian, J. Kirchhof, B. Kuhlow *et al.*. Birefringence free planar optical waveguide made by flame hydrolysis deposition (FHD) through tailoring of the overcladding [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(2): 193~198
- 12 S. M. Ojha, C. Cureton, T. Bricheno *et al.*. Simple method of fabricating polarization-insensitive and very low crosstalk AWG grating devices [J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(1): 78~79
- 13 S. Kashimura, M. Takeuchi, K. Maru *et al.*. Loss reduction of GeO₂-doped silica waveguide with high refractive index difference by high-temperature annealing [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2000, **39**: 521~523
- 14 G.C. Schwartz, P. Johns. Gap-fill with PECVD SiO₂ using deposition/sputter etch cycles [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1992, **139**(3): 927~932
- 15 S. Uppal, Arthur F. W. Willoughby. Diffusion of boron in germanium at 800~900 °C [J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, **96**(3): 1376~1379