

# 紫外曝光法制备高掺锗光波导分束器及耦合器

任一涛<sup>1</sup> 黄楚勇<sup>1</sup> 罗金龙<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 云南大学物理科学技术学院, 云南 昆明 650091

<sup>2</sup> 昆明学院物理科学与技术系, 云南 昆明 650214

**摘要** 通过优化氮氧化硅薄膜的制备, 获得均匀平整、掺锗浓度高的氮氧化硅薄膜。在优化光波导耦合器设计、载氢、紫外曝光等过程的基础上, 利用 KrF 准分子激光, 在掺锗氮氧化硅平面光波导中制备出了单模条形波导以及波导型耦合器和分束器。紫外光照射后重掺锗(锗掺杂原子数分数约为 20%)平面光波导芯区的折射率最大增加约 1.03 倍, 形成的条形波导传输损耗为 0.28~0.32 dB/cm。实验表明紫外光曝光强度与掺锗氮氧化硅玻璃折射率的改变量是非线性的, 折射率的变化可调整载氢压强和时间、紫外照射的光强度、材料掺锗浓度等参数来控制。

**关键词** 光学器件; 紫外写入; 平面光波导; 折射率; 光耦合器; 集成光学

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.092301

## Design and Fabrication of Heavy Germanium Loading Waveguide Splitters and Couplers by UV Exposure Method

Ren Yitao<sup>1</sup> Huang Chuyong<sup>1</sup> Luo Jinlong<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Physical Science and Technology, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650091, China

<sup>2</sup> Department of Physical Science and Technology, Kunming University,

Kunming, Yunnan 650214, China

**Abstract** Uniform and heavily Ge-doped silicon oxy-nitride film is obtained by optimized fabrication of silicon oxy-nitride film. Based on an optimal design of waveguide coupler, hydrogen loading and ultraviolet (UV) irradiation intensity, single-mode channel waveguides and waveguide couplers, made from germanium-doped silicon oxy-nitride, are fabricated by an UV irradiation from a KrF excimer laser on a planar waveguide. The maximum index increase is up to 1.03 times for heavy Ge-loading (about 20% atomic fraction) waveguide core after the UV irradiation, and the transmission loss of the UV-written channel waveguide is 0.28~0.32 dB/cm. Experimental results demonstrate that the index increase in the Ge-doped silicon oxy-nitride with UV irradiation intensity is not linear, and it can be controlled by changing the hydrogen loading pressure and time, UV intensity and Ge-loading level.

**Key words** optical devices; ultraviolet writing; planar optical waveguide; refractive index; optical coupler; integrated optics

**OCIS codes** 230.7370; 160.5320; 140.3500; 230.3120; 130.3120; 310.6860

## 1 引言

信息数据传输量的剧增促进了光纤网络的扩张及光传输技术的迅猛发展<sup>[1,2]</sup>, 光通信系统中所需的基本光器件(如光耦合器、光开关、光调制器等)日益受到重视<sup>[3]</sup>, 尤其是新型、多功能、集成度高的硅基光波导器件。硅基光波导器件具有体积小、性能稳定可靠、集成度高、抗环境干扰等独特优势, 目前, 用二氧化硅材料制作的集成波分复用器、光分路器等光波导器件已成功应用于光网络中<sup>[4-5]</sup>。集成玻璃光子器件的基础是集成光路或二氧化硅光波导的制作, 作为广泛应用于集成光路的条形光波导, 其制备方法一般有两种: 光刻-反应离子刻蚀法<sup>[4,6-7]</sup>和紫外(UV)光法<sup>[8-12]</sup>。两种方法各具特点, 使用中各有其优势。光刻-反应离子

收稿日期: 2013-04-15; 收到修改稿日期: 2013-04-25; 网络出版日期: 2013-08-07

基金项目: 国家自然科学基金(60867002)、云南省高校科技创新团队支持计划

作者简介: 任一涛(1960—), 男, 博士, 教授, 主要从事光学、光波导及其器件、光纤和光电子技术等方面的研究。

E-mail: ytren@ynu.edu.cn

刻蚀法须在超净室里进行,涉及的工序多(掩模制作、光刻、反应离子刻蚀等),所使用的设备昂贵,复杂的工艺过程难于保证条形光波导边缘陡直平滑,因而制作的光波导光子器件的成本较高。紫外光法是新发展的制作玻璃条形光波导的方法,相比光刻-反应离子刻蚀法,紫外光法制作条形光波导的过程少且相对简单,使用的设备相对便宜,它改善了光波导芯层与上包层的界面质量,有效降低了条形光波导的传输损耗。无论是直接写入法<sup>[10]</sup>还是紫外曝光法<sup>[9]</sup>,紫外光法均需要先制备芯层为掺锗 SiO<sub>2</sub> 的基本三层平面光波导,在紫外光的照射下,光波导芯层受照射局部掺锗 SiO<sub>2</sub> 玻璃的折射率得以显著增加,从而形成玻璃条形光波导<sup>[11-13]</sup>。紫外直接写入法运用聚焦的连续紫外激光光束照射光波导芯层,对平面光波导进行逐条制作;紫外曝光法则借助制作在平面光波导上包层表面上带有波导图形结构的掩模,让紫外光透过掩模照射平面光波导,一次成形多条光波导或复杂的光波导结构,用紫外光法制作较窄的条形光波导及其复杂的集成器件结构时优势较为突出。此外,直写法可通过控制聚焦激光光束的光斑尺寸和扫描速度来调节所需条形光波导芯区的宽度和折射率分布等参数,有利于对光子器件光路的局部结构进行深加工或局部处理。

掺锗二氧化硅玻璃经紫外光照射后折射率发生变化为用紫外曝光法制备条形光波导创造了条件。以往紫外光照射法多用于在轻掺锗的玻璃光纤中制备光纤光栅<sup>[14]</sup>,它能产生的折射率改变较小;紫外光照射制备条形光波导的材料大多是掺锗二氧化硅玻璃<sup>[9,11,13]</sup>,用掺锗氮氧化硅玻璃制备条形光波导的较少,国外文献报道的掺锗浓度(原子数分数)约 13%<sup>[8,10]</sup>。氮氧化硅玻璃具有比氧化硅玻璃更好的化学稳定性和致密性,已被广泛应用于半导体工业作为一种高效器件钝化膜。用紫外光照射掺锗氮氧化硅玻璃制作光波导,可充分利用氮氧化硅材料优越的化学和物理特性,又可借助成熟的半导体工艺技术,以低成本制备光波导器件。为提高氮氧化硅材料的紫外光灵敏度并在紫外光照射后获得较大的折射率变化,增大氮氧化硅材料中的掺锗量是最直接的办法。氮氧化硅中引入锗能产生与锗相关的结构缺陷数量,增加氮氧化硅材料对紫外光的吸收,又可在强紫外光照射时,在材料中产生足够的 Si-OH 和锗缺氧中心,引起其折射率的变化。但掺锗量过大将会造成光波导传输损耗过高,材料稳定性降低。

本文用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)方法<sup>[15]</sup>制备掺锗氮氧化硅薄膜,通过优化反应气体比例、射频功率密度、衬底温度等工艺参数,克服氮氧化硅材料组分的制约,尽可能增大氮氧化硅材料的含锗量。获得了膜厚均匀、缺陷密度低、掺锗多(约 20%)、折射率适合的氮氧化硅薄膜。并运用紫外曝光法,用脉冲 KrF 准分子激光照射掺锗氮氧化硅玻璃薄膜,使被照射的薄膜具有较大的折射率增加,通过控制紫外光功率和扫描速度,制备出单模、波导传输损耗较低的条形光波导及满足设计要求的光波导分束器和耦合器。

## 2 光波导耦合器及开关的设计

光分束器、光耦合器及光开关是光通信器件中较为常用的光器件。为使光器件微型化和集成化,本研究设计了光波导分束器、耦合器及由它们组合而成的光开关,如图 1 所示。设计中 Y 形分束器将进入光束分成两路,过渡到分离的两根直波导,然后通过定向耦合器会合并输出。在优化得到单模条形光波导的参数后,运用二维有效折射率有限差分光束传播法(EI-FD-BPM)<sup>[16]</sup>对图 1 所示器件结构进行光传播模拟,优化得出具有较高输出能量的条形光波导分束器、光耦合器及其最佳的结构设计参数(横截面尺寸、器件结构及尺寸等)。由于分叉弯曲条形光波导会造成光传输能量的额外损失,设计时

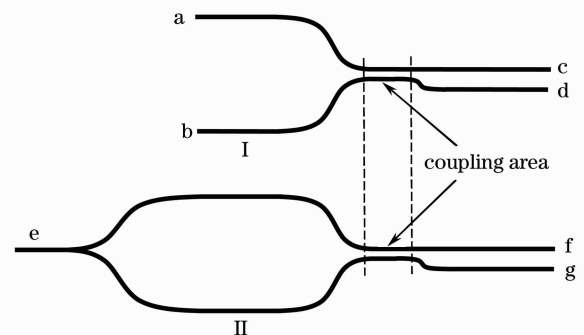


图 1 光波导分束器、耦合器示意图

Fig. 1 Design diagram of waveguide splitter and coupler

首先对 Y 形分束器弯曲波导的形式、长度、分支间距进行优化,以得到最大的传输光能量。计算表明,对于分支间距和长度均相同的弯曲波导,随着弯曲波导长度的增加,分支角度减小,弯曲损耗逐渐减小,输出光能量逐渐增大;在弯曲波导长度相同时,随着两臂分开距离的增加,光损耗也越来越大,输出光能量逐渐降低。如果在正弦型,余弦型和 S 型三种不同弯曲条形波导中要获得相同的光能量输出,则余弦型弯曲波导沿传播方向上的长度最短,从而便于降低光波导器件的尺寸,提高器件的集成度。因此,本研究中选定余弦型弯曲

波导作为光分束器、光耦合器的分支波导结构。

为评估定向耦合直波导的传输特性,针对定向耦合器的耦合长度、耦合间距等参数也进行了优化,得到波导定向耦合器光能量变化的典型输出如图 2 所示。对耦合间距一定的定向耦合器,从一根波导输出的能量随耦合直波导的长度呈周期性变化,当定向耦合器上下直波导获得等强度光能量输出时耦合器即为 3 dB 耦合器。若定向耦合器耦合长度满足某特定条件,达到完全耦合,耦合器的输出光能量将随之仅从上波导或下波导输出。

对图 1 中所示的耦合器结构 I,为保证工艺上加工得到高质量、高耦合效率的定向直波导,设定两定向直波导的耦合间距为  $2.5 \mu\text{m}$ ,计算得出当耦合长度为  $5100 \mu\text{m}$ ,可保证光能量最大程度从上波导 c 输出,输出的能量为输入能量的  $81.06\%$ ;这时下波导 d 的输出能量几乎为零(输出能量为  $0.03\%$ ),如图 3(a)所示。这时若定向耦合器的耦合特性发生变化,其上下波导能同时有光能量输出。对图 1 中所示的结构 II 而言,若在 Y 形分束器上臂发生  $90^\circ$  的相位变化,原来仅从上臂 f 输出的光便改由仅从下臂 g 中输出,实现开关功能,如图 3(b)所示。

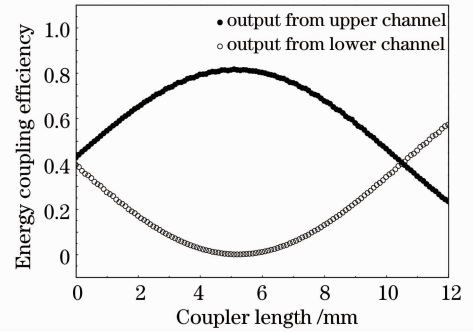


图 2 定向耦合直波导耦合输出能量随长度的变化

Fig. 2 Output power from the directional coupler versus coupler length

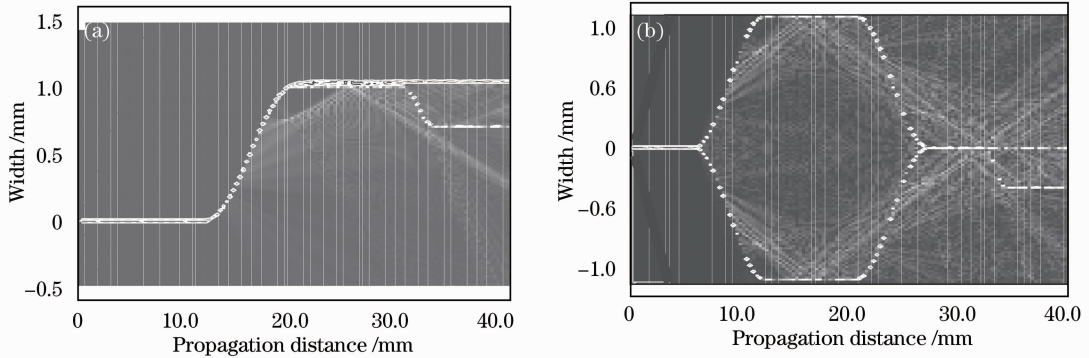


图 3 (a)光波导耦合器和(b)开关的传输模拟结果

Fig. 3 Simulation results of power propagation from (a) a waveguide coupler and (b) a switch

### 3 实 验

实验中采用紫外曝光法制备条形光波导及光波导分束和耦合器,制作示意图如图 4(a)所示。图 4(b)给出了紫外直接写入法制备条形光波导的示意图。紫外曝光法制备条形光波导涉及到平面光波导的制备、光波导芯层的掺锗量、掩模的制备、载氢工艺、紫外光照射的强度等因素,它们关系到制备出的条形波导芯区的折射率大小和均匀性以及光波导芯区宽度的规则性,最终影响到波导的单模性及耦合器和分束器的质量。下面分别就这几个因素加以说明。

1) 平面光波导的制备:用紫外曝光法制作条形光波导需先制备三层平面光波导结构。在单晶硅片上淀积光波导下包层后在其上面淀积光波导的芯层和上包层。实验中三层结构的光波导用 PECVD 制备,光波导上下包层的厚度各约为  $4 \mu\text{m}$ ,光波导的芯层即掺锗的氮氧化硅玻璃薄膜厚度约为  $2.6 \mu\text{m}$ 。

2) 掺锗浓度的确定:通过对平面光波导芯层掺锗(即  $\text{GeO}_2$ ),一方面使芯层的折射率高于其上下包层,又借助掺杂在  $\text{SiO}_2$  中的锗增加对紫外光的吸收,形成紫外光敏层,从而当紫外光照射掺锗的氮氧化硅玻璃后,被照射的局部区域的折射率得以显著增加,最终形成玻璃条形光波导。用 PECVD 制备掺锗氮氧化硅玻璃薄膜时,参加反应的气体包括硅烷( $\text{SiH}_4$ )、锗烷( $\text{GeH}_4$ )、氨气( $\text{NH}_3$ )和一氧化二氮( $\text{N}_2\text{O}$ ),它们在化学反应过程中形成氧化物颗粒沉积在单晶硅片表面,再经高温致密熔融成掺锗氮氧化硅玻璃沉积层。掺锗氮氧化硅玻璃的折射率和厚度可以通过改变反应气体的组分、淀积的温度和淀积的时间加以控制和改变。为获

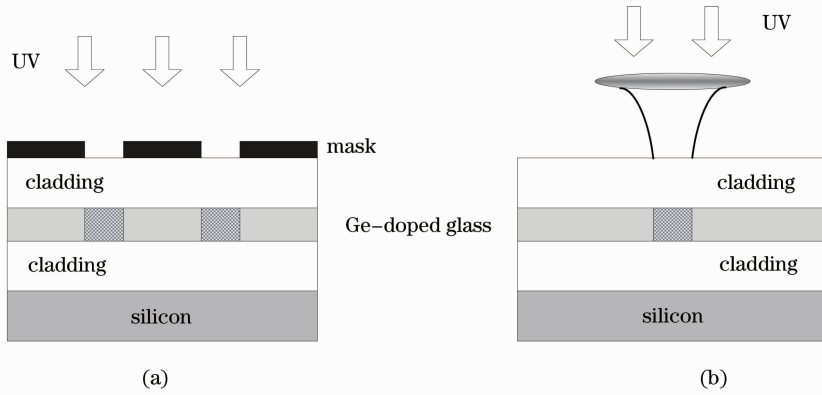


图4 紫外光法制作玻璃条形光波导示意图。(a)紫外曝光法;(b)紫外直接写入法

Fig. 4 Diagram of fabricating UV-written channel waveguides. (a) UV exposure method; (b) direct UV writing method

得较大的掺锗量,而不致使掺锗氮氧化硅薄膜产生过高的缺陷密度和光传输损耗,同时使掺锗氮氧化硅薄膜的折射率与掺锗量间保持一个简便的递增关系,优化了反应气体配比、射频功率密度、衬底温度等工艺过程,确定了制备的典型工艺参数,如表1所示。经过大量的实验,获得了膜厚均匀、淀积速率高、重复性好的氮氧化硅薄膜。薄膜的掺锗量约20%,且缺陷密度低,满足条形光波导的制备需要。

表1 平面光波导材料制备工艺参数

Table 1 Fabrication parameters used in fabricating planar glass waveguides film

Glass film	Reaction gas flow rate					Deposition temperature / $^{\circ}\text{C}$
	$\text{SiH}_4$ /sccm	$\text{N}_2\text{O}$ /sccm	$\text{GeH}_4$ /sccm	$\text{NH}_3$ /sccm	$\text{N}_2$ /sccm	
Ge:SiON	14	1600	300	190~200	833	300
$\text{SiO}_2$	17	1600				300

工艺条件优化后,便可在制备氮氧化硅薄膜时,通过调整反应混合气体中的氨气量改变掺锗氮氧化硅玻璃的折射率,如图5所示。在保证输入氨气流量稳定的范围内,得到的掺锗氮氧化硅玻璃的折射率随参加反应的氨气流量基本呈线性关系。折射率的测量结果表明,当氨气流量控制在190~200 sccm(1 sccm即在 $0^{\circ}\text{C}$ ,1个标准大气压下 $1\text{ cm}^3/\text{min}$ )时,得到的掺锗氮氧化硅薄膜折射率满足平面光波导芯层折射率的设计要求。

3) 表面金属掩模的制备:通过光刻工艺,将掩模版上的器件结构设计图形转移到平面光波导表面,在其表面形成带有条形光波导或光耦合器结构的金属掩模,以控制紫外光照的通光区域。

4) 载氢——平面光波导的紫外增敏:要利用紫外光法制作条形光波导,制作平面光波导的材料必须能够吸收足够的紫外辐射。因掺锗的氮氧化硅玻璃在240 nm附近存在一个较强的吸收带<sup>[17-18]</sup>,用掺锗的氮氧化硅玻璃作为平面光波导的芯层,可在提高芯层折射率的同时,使掺锗的氮氧化硅玻璃具有对紫外光的敏感性。然而,掺锗氮氧化硅玻璃的紫外光敏感性一般较弱,即使在氮氧化硅玻璃中尽可能多地掺入锗,受材料组分的制约,所能掺入的锗含量有限,因而实际提高其光敏性的作用也是有限的。载氢技术被用来对掺锗的氮氧化硅玻璃进行紫外增敏处理,进一步增强其对紫外光的敏感度<sup>[19-20]</sup>,便于用紫外光辐射制作玻璃条形光波导。对此,实验中设计了具有双重保护结构的专用高压密封室(承压大于15 MPa)用于对平面光波导进行载氢。高压密封室外接高压氢气,并可安全实现补气、断气和排气等功能。高压氢气的最大压强取决于市场上能购到的瓶装高纯氢气最大输出气压(13 MPa)。将含有掺锗氮氧化硅玻璃芯层的平面光波导样品置入高压氢气密封室内,在室温条件下维持

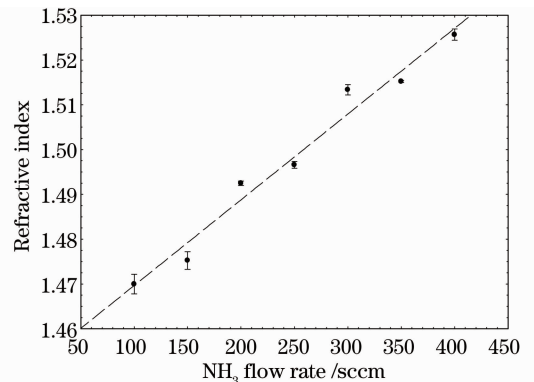


图5 掺锗二氧化硅玻璃薄膜折射率与氨气流量  
Fig. 5 Refractive index (at 632.8 nm) of Ge-doped silicon oxy-nitride film versus  $\text{NH}_3$  flow rate



14~30 d,载氢结束后取出样品进行紫外光照射。

5) 紫外曝光的照射强度:室温载氢过程中,氢在高压下逐步扩散到掺锗氮氧化硅玻璃中,使掺锗氮氧化硅玻璃对紫外光的敏感性得以大幅提高和改善,变成紫外光敏层。因而当用紫外光局部照射掺锗氮氧化硅玻璃时,被照射区域吸收紫外光子后其折射率便发生显著增加。实验中采用 KrF 准分子激光器(Lambda Physik 公司,LPX 200)为紫外光源,将 248 nm 的准分子激光束通过柱透镜组聚焦准直后,形成约 3 mm×20 mm 的矩形光斑,透过样品表面的金属掩模照射到平面光波导样品上,激光器输出脉冲的重复频率为 50 Hz。

## 4 实验结果和讨论

实验中把矩形光斑的平均能量密度控制为 2000 J/cm<sup>2</sup> 或 3000 J/cm<sup>2</sup>,对载氢处理后的平面光波导进行紫外曝光,平面光波导沿着掩模上条形光波导的方向移动,移动速度(2~3 μm/s)由固定电动平移台控制,直至整个 1.5~2.5 cm 长的光波导芯片被扫描完毕。对得到的光波导芯片(条形波导的宽度为 8 μm 或 10 μm,波导高为 2.6 μm)输入 1550 nm 波长的激光,条形波导及其通光后输出模的光场如图 6 所示。实验测试中,上下、左右改变入射光进入光波导的方向,均未发现有高阶模出现,表明得到的条形光波导是单模波导。

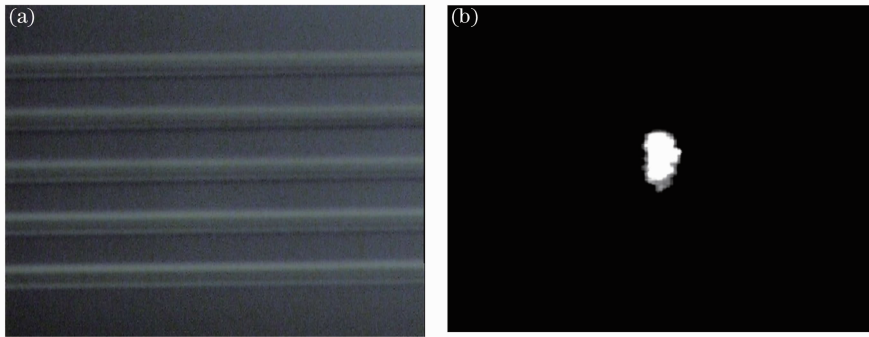


图 6 (a)紫外光法制作的玻璃条形光波导(b)及其单模光场

Fig. 6 (a) UV-written channel waveguides and (b) an image of the output fundamental mode

此外,对紫外曝光制备的耦合器结构[如图 7(a)所示]进行了测试,当光从图 1 所示耦合器 I 的 a 端输入时,观察到仅有一个输出的光点。对耦合器的定向耦合结构进行局部加热处理,改变定向耦合器的耦合条件,这时发现另一个光点从前一个光点的右边出现[如图 7(b)所示],表明前一个光点是从 d 端输出的光;由于外界的干扰使定向耦合器失去完全耦合条件,部分应该从 d 端输出的光直接沿着光波导到了 c 端输出,从而实验中观察到了两个并列的光点。这同时也说明紫外曝光制备的耦合器定向耦合结构基本达到了设计要求,实现了完全耦合功能。对于设计的 3 dB 分束器,实验测试中得到的分束比大多为 50:44,最好的接近 50:47,这主要是由于在制备平面光波导表面的掩模时,因工艺原因造成金属掩模的边沿不够光滑,加上定向耦合波导间的距离较小时衍射效应的存在导致毛刺较多,影响制备得到的定向耦合器性能,使光能量的分离

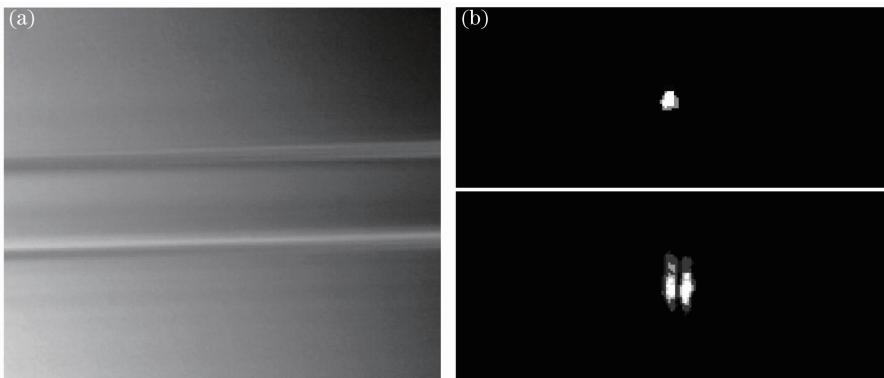


图 7 (a)紫外光法制作的耦合器定向耦合区域及(b)耦合器输出光场

Fig. 7 (a) Directional coupler of an UV-written waveguide coupler and (b) its light output

不够均衡,出现一支光路的损耗较大。

运用条形光波导基模输出光强度分布曲线的方法来测定实验中制备出的条形波导芯区折射率<sup>[19]</sup>,计算紫外曝光后条形光波导芯区的折射率及其变化,达到 $10^{-3}$ 量级的精度。为得到获得单模条形波导所需的平面光波导芯层折射率,反复实验后将芯层的掺锗浓度控制为20%。这样平面光波导经紫外光照射后,便能产生形成单模条形波导的折射率增量,相应的曝光条件数据如表2所示。

表2 条形光波导曝光参数及芯区折射率的增加值

Table 2 Exposure parameters and core index increase in different channel waveguides

Sample	Hydrogen pressure /MPa	Loading time /d	Width of channel waveguide / $\mu\text{m}$	Exposure density /( $\text{J}/\text{cm}^2$ )	Ge concentration /%	Times of index increase in core
1	13	14	8	2000	~20	1.0066
2	13	14	10	2000		1.0078
3	13	14	8	3000		1.0160
4	13	14	10	3000		1.0152
5	13	30	8	2000		1.0214
6	13	30	10	2000		1.0223
7	13	30	8	3000		1.0284
8	13	30	10	3000		1.0312

从表2中的数据可以看出,相同芯区厚度的平面光波导样品经相同条件的载氢和紫外光照射后,宽度分别为 $8\ \mu\text{m}$ 和 $10\ \mu\text{m}$ 的条形光波导芯区的折射率增加量大致相同。在载氢压强一定时,较长的载氢时间有助于 $\text{H}_2$ 充分进入玻璃材料内部,使整个样品尽可能充分、均匀光敏化。对同样的曝光条件来说,继续增加近一倍载氢时间所引起的条形光波导芯区的折射率已不是成倍增加,增加量呈缓慢上升,表明光敏化过程已逐渐趋于饱和。制备平面光波导芯层时,通过对氮氧化硅掺锗来提高氮氧化硅材料的折射率,由于锗在氮氧化硅玻璃中浓度的提高,增加了玻璃中与锗相关的结构缺陷数量,如 $\text{Si-O-Ge}$ ,从而导致掺锗氮氧化硅玻璃折射率的增大。载氢过程中,氢分子在高压下扩散到掺锗玻璃结构中,改变了氮氧化硅玻璃材料的电极化率。同时经强紫外光的照射,玻璃材料因吸收紫外光子造成温度上升,氢分子在缺陷 $\text{Si-O-Ge}$ 的键处便发生反应,产生出大量的 $\text{Si-OH}$ 和锗缺氧中心。紫外光的持续照射使锗缺氧中心的吸收带被漂白,造成掺锗 $\text{SiO}_2$ 玻璃的密度发生变化,最终被紫外光照射的玻璃的折射率增大<sup>[11,19-22]</sup>,形成条形光波导。

实验中还发现对经历相同制备过程。曝光参数相同的光波导样品,有时最终形成的条形光波导的芯区折射率彼此有差异,尤其是曝光时间较长(尺寸稍长)的光波导芯片。这表明在氢加载时,除样品个体对氢分子的吸收有差异外,在紫外曝光过程中,光波导样品中的氢分子逸出量也不同,造成样品对紫外光吸收的灵敏度不同,最终导致不同样品的折射率变化有差异。为降低氢分子逸出带来的影响,实验中运用半导体制冷片冷却平面光波导芯片,使其温度低于 $0\ ^\circ\text{C}$ ,以此减缓氢分子的逃逸,减小长时间曝光形成的折射率变化差异,提高光波导芯区折射率的均匀性。所以,用紫外曝光法制备条形光波导及其器件时,增大玻璃材料中的掺锗量,延长载氢时间,提高紫外光照射强度,可以造成条形光波导芯区折射率有较大的增加。实验中平面光波导芯区掺锗浓度约20%,经30 d室温载氢,用 $3000\ \text{J}/\text{cm}^2$ 的紫外光照射后,制备出的条形光波导芯区的折射率可增大达1.03倍,直波导(宽度为 $8\sim 10\ \mu\text{m}$ ,高度为 $2.6\ \mu\text{m}$ )的传输损耗为 $0.28\sim 0.32\ \text{dB}/\text{cm}$ 。此外,实验中还复测了放置在室温中2~3年的掺锗氮氧化硅条形光波导样品的折射率,复测后发现多数样品的折射率较原来有所衰减,但衰减幅度较小,不影响实际使用。稳定性测试表明在常温下,高掺锗氮氧化硅玻璃经紫外光照射制成的条形光波导具有足够的稳定性。至今为止,虽然掺锗 $\text{SiO}_2$ 光敏效应的物理起因和微观机制还不很清楚,但载氢技术已广泛用于掺锗 $\text{SiO}_2$ 玻璃的紫外增敏,应用于紫外光照射制备玻璃条形光波导及各种波导光子器件。

## 5 结 论

在光波导耦合器优化设计和优化氮氧化硅薄膜制备工艺的基础上,获得均匀平整、掺锗浓度高的氮氧化硅平面波导。通过紫外光曝光方法,在硅基掺锗氮氧化硅平面波导中制备出了单模条形光波导以及波导型

分束器和耦合器。对掺锗浓度约 20% 的平面光波导,制备出的单模条形光波导芯区折射率增大了 1.03 倍,相应的波导传输损耗为 0.28~0.32 dB/cm。与光刻—反应离子刻蚀法制备条形光波导相比,紫外光方法具有所需设备少、制备过程相对简单、光波导包层/芯区界面质量好等特点,具有制作结构复杂、低损耗的光波导器件的潜在优势,还可利用特殊控制的紫外光束对光子器件局部进行处理。紫外光曝光强度与掺锗氮氧化硅玻璃折射率的永久改变量是非线性的,光波导样品的紫外光敏性与载氢时氢气的压强、持续时间密切相关,最终折射率的变化可通过紫外照射强度、载氢压强和时间、材料掺锗浓度等参数来调节。

### 参 考 文 献

- 1 Guo Yamin, Zhang Xuping, Xie Fei, *et al.*. Characteristic research and detection scheme of gigabit passive optical network upstream optical signal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0306003.  
郭亚敏, 张旭苹, 谢 飞, 等. 千兆无源光网络上行光信号特性研究与检测方案[J]. *光学学报*, 2011, 31(3): 0306003.
- 2 Zhang Tieying, Wang Hongxing, Shi Jianguo, *et al.*. Spectral characteristics of dual amplitude pulse position modulation in optical communications [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(3): 0305001.  
张铁英, 王红星, 史建国, 等. 光通信中双幅度脉冲位置调制的功率谱分析[J]. *中国激光*, 2011, 38(3): 0305001.
- 3 Chen Youhua, Zhang Jilong, Wang Yanchao, *et al.*. Single crystal photo-elastic modulator based on lithium niobate piezoelectric and photo-elastic effect [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1116002.  
陈友华, 张记龙, 王艳超, 等. 基于铌酸锂压电弹光双效应的单晶体弹光调制器[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1116002.
- 4 M Kawachi. Silica waveguides on silicon and their application to integrated-optic components [J]. *Opt Quantum Electron*, 1990, 22(5): 391—416.
- 5 Akimasa Kaneko, Akio Sugita, Katsunari Okamoto. Recent progress on arrayed waveguide gratings for DWDM applications [J]. *IEICE Trans Electron*, 2000, E83-C(6): 860—868.
- 6 S Valette. State of the art of integrated optics technology at LETI for achieving passive optical components [J]. *J Mod Opt*, 1988, 35(6): 993—1005.
- 7 Lang Tingting, Lin Xufeng, He Jianjun. Fabrication of silica-on-silicon arrayed waveguide gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0213003.  
郎婷婷, 林旭峰, 何建军. 硅基二氧化硅阵列波导光栅制作工艺的研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0213003.
- 8 M Svalgaard, C V Poulsen, A Bjarklev, *et al.*. Direct UV-writing of buried single-mode channel waveguides in Ge-doped silica films [J]. *Electron Lett*, 1994, 30(17): 1401—1402.
- 9 Wu Yuanda, Xia Junlei, An Junming, *et al.*. Fabrication of optical waveguide devices with UV-writing technology [J]. *Chinese J Semiconductors*, 2006, 27(4): 744—746.  
吴远大, 夏君磊, 安俊明, 等. 紫外写入技术制备光波导器件研究[J]. *半导体学报*, 2006, 27(4): 744—746.
- 10 M Svalgaard. Directly writing planar waveguide power splitter and directional couplers using a focused ultraviolet beam [J]. *Electron Lett*, 1997, 33(20): 1694—1695.
- 11 V M Marchenko. Photoinduced transformations of oxygen-deficient centers in silica and germanosilicate glasses [J]. *Glass Physics and Chemistry*, 1995, 21(4): 263—272.
- 12 K O Hill, Y Fujii, D C Johnson, *et al.*. Photosensitivity in optical fiber waveguides; application to reflection filter fabrication [J]. *Appl Phys Lett*, 1978, 32(10): 647—649.
- 13 Kelly D Simmons, George I Stegeman, Barrett G Potter, Jr, *et al.*. Photosensitivity of solgel derived germanosilicate planar waveguides [J]. *Opt Lett*, 1993, 18(1): 25—27.
- 14 Li Jianzhi, Jiang Desheng. Hydrogen loading and photolytic index changes in germanosilicate fiber [J]. *J Inorganic Materials*, 2006, 21(2): 345—350.  
李剑芝, 姜德生. 载氢与掺锗石英光纤的光致折射率改变[J]. *无机材料学报*, 2006, 21(2): 345—350.
- 15 D A P Bulla, N I Morimoto. Deposition of thick TEOS PECVD silicon oxide layers for integrated optical waveguide applications [J]. *Thin Solid Films*, 1998, 334(1-2): 60—64.
- 16 Wang Chaoyan, Ren Yitao, Meng Rong, *et al.*. Optimal calculations for the transmission field of Mach-Zehnder channel waveguide switches [J]. *J Yunnan University (Natural Science Edition)*, 2011, 33(1): 45—50.  
王超燕, 任一涛, 孟 荣, 等. Mach-Zehnder 条形光波导开关传输光场的优化计算[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2011, 33(1): 45—50.
- 17 A J Cohen, H J Smith. Ultraviolet and infrared absorption of fused germania [J]. *J Phys Chem Solids*, 1958, 7(4): 301—306.

- 18 P C Schultz. Ultraviolet absorption of titanium and germanium in fused silica [C]. Proceedings of XI International Congress on Glasses, 1977, 3: 155—158.
- 19 P J Lemaire, R M Atkins, V Mizrahi, *et al.*. High pressure H<sub>2</sub> loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO<sub>2</sub> doped optical fibres [J]. Electron Lett, 1993, 29(13): 1191—1193.
- 20 R M Atkins, P J Lemaire, T Erdogan, *et al.*. Mechanisms of enhanced UV photosensitivity via hydrogen loading in germanosilicate glasses [J]. Electron Lett, 1993, 29(14): 1234—1235.
- 21 Ren Yitao, Huang Yin, Ding Xinren, *et al.*. Core index measurement and calculation of the UV-written optical channel waveguides [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38 (s1): s108006.  
任一涛, 黄寅, 丁心仁, 等. 紫外写入条形光波导芯区折射率的测算[J]. 中国激光, 2011, 38(s1): s108006.
- 22 R M Atkins, V Mizrahi, T Erdogan. 248 nm induced vacuum UV spectral changes in optical fiber perform cores: support for a colour centre model of photosensitivity [J]. Electron Lett, 1993, 29(4): 385—387.