

文章编号 1004-924X(2011)10-2342-07

# 可激发等离子体表面波的离子交换单模条波导

刘 瑾<sup>1,2</sup>, 陈抱雪<sup>1\*</sup>, 杨海马<sup>1</sup>

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院 上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093;  
2. 上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海 201620)

**摘要:**设计并制备了离子交换单模条波导,用于激发等离子体表面波。研究了波导设计过程中相关参数的确定方法、条波导制备过程涉及的二维扩散问题,折射率分布以及等离子体表面波的激发等。基于  $\text{Ag}^+-\text{Na}^+$  离子交换技术在德国 B270 光学玻璃上制备出渐变型平面波导,采用余误差函数拟合其折射率分布,得到了一定工艺参数下的光波导扩散系数  $D_{\text{eff}}$  与折射率增量值  $\Delta n$ 。在此基础上,利用等效折射率法给出单模波导条件,设计相应的工艺参数,以光刻技术为核心在 0.1%  $\text{AgNO}_3 \sim 99.9\% \text{NaNO}_3$  混合熔融盐中实验制备了单模条波导,并进行模场分布测试。结果表明,制得的单模条波导具有良好的单模特性;在此波导上镀 50 nm 的金膜,采用 40%~70% 的甘油溶液进行测试,可激发等离子体表面波。

**关键词:**单模条波导;离子交换;等离子体表面波

**中图分类号:** TN252 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111910.2342

## Ion-exchange single-mode stripe waveguide for excitation of surface plasma wave

LIU Jin<sup>1,2</sup>, CHEN Bao-xue<sup>1\*</sup>, YANG Hai-ma<sup>1</sup>

(1. Shanghai Key Laboratory of Modern Optical Systems, School of Optical-electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. College of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

\* Corresponding author, E-mail: bxchen55@live.cn

**Abstract:** An ion-exchange single-mode stripe waveguide was designed to excite the surface plasma wave. The experimental determination method of relative parameters, the two-dimensional diffusion and refractive index distribution of the stripe waveguide and the excitation of surface plasma wave were investigated. Based on  $\text{Ag}^+-\text{Na}^+$  ion-exchange technology, the planar waveguide with a graded refractive index was prepared on Germany B270 optical glass. By taking a complementary error function to fit the refractive index distribution, the diffusion coefficient ( $D_{\text{eff}}$ ) and the refractive index increment ( $\Delta n$ ) of the waveguide were obtained under certain process parameters. On this basis, the condition of single-mode waveguide was calculated by using equivalent refractive index method and the corresponding technological parameters were designed. Finally, the single-mode strip waveguide was

收稿日期:2010-12-13;修订日期:2011-02-17.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61077042;60677032);上海市重点实验室建设资助项目(No. 08DZ2272800);上海市重点学科建设资助项目(No. S30502);上海市科委资助项目(10160501700);上海工程技术大学校教学建设项目(k20110201;p201102003;k201102003)

prepared in the 0.1% AgNO<sub>3</sub>~99.9% NaNO<sub>3</sub> mixed molten salt based on the lithographic technology. The test result of mode field distribution shows that the waveguide prepared has a good single-mode characteristic. When the waveguide is coated with 50 nm Au film, and tested by glycerine solution with different concentrations from 40% to 70%, it can excite surface plasma waves successfully.

**Key words:** single-mode stripe waveguide; ion-exchange; surface plasma wave

## 1 引 言

现有的等离子体共振 (SPR) 传感器从激发等离子体表面波 (SPW) 耦合的方式上可分为: 棱镜型、波导型和光纤型几种。棱镜型 SPR 传感器需要昂贵的精密角度转动装置和控制系统, 较难实现在线测量; 光纤结构与波导结构的 SPR 传感器具有体积小, 结构简单, 测量简易、快速, 易于实现在线测量和多通道检测等特点<sup>[1]</sup>, 是 SPR 传感器发展的主要趋势; 另外, 波导型结构模式比光纤结构便于分析, 因此其受到了广泛的关注<sup>[2-9]</sup>。大部分波导型 SPR 传感器采用平面波导结构, 无法实现与光纤的固化对接。光波的输入/输出必须采用棱镜耦合等精细操作方式, 这导致工作环境要求高、测试操作难度大, 而采用条波导构造、形成与光纤对接的固化结构是较好的选择。离子交换条波导制备成本低、可实现与光纤对接封装, 具有广泛应用前景。精确传感通常采用单模条波导, 因此确定单模条波导折射率的分布是实现传感解析的必要条件。离子交换单模条波导折射率分布测试困难, 缺少有效且实用的方法。

本文为控制离子交换条波导的折射率分布, 提出一种获得离子交换等效扩散系数和表面折射率增量的实验确定方法。导出了离子交换条波导制备过程涉及的两维扩散方程的一般解, 拟合推出了离子交换条波导的折射率分布。利用等效折射率法给出单模波导条件, 并设计了相应的工艺参数, 最终制备了条波导, 模场分布的测试表明所制备的条波导单模特性良好。采用光纤—光波导耦合测试系统进行等离子体表面波的激发实验, 实现了等离子体表面波激发, 完成了折射率的传感。本文为条波导的制备提供了有效的拟合推导方法, 所构建的测试系统具有在线、适应能力强、

快速高效、准确、可靠性高、操作简便等特点。

## 2 等离子体表面波的激发

由于金属的特殊光学性质, 使得金属与介质界面处可传输 SPW, 为有效激励 SPW, 入射光模式应为 TM 模 (磁矢量与传播方向垂直的模式), 入射光沿平行于界面的波矢分量为  $k_x$ , 若存在表面等离子波, 则其波矢  $k_{sp}$  可表示为

$$k_{sp} = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r^{(f)} \epsilon_r^{(m)}}{\epsilon_r^{(m)} + \epsilon_r^{(f)}}}, \quad (1)$$

其中  $\epsilon_r^{(m)}$  和  $\epsilon_r^{(f)}$  分别代表金属膜和介质的介电常数, 如果满足

$$k_x = k_{sp}, \quad (2)$$

则入射光在金属膜中激励 SPW, 这时光谱中某一小范围内出现衰减吸收现象。波导型 SPR 结构如图 1 所示, 光波在波导中传播, 当光波进入表面覆盖有金属层的区域时, 消逝波将穿透金属层, 在金属外层边界激发出 SPR 谐振现象, 可在波导的出口检测到 SPR 曲线, 易于实现微型化, 稳定性好。

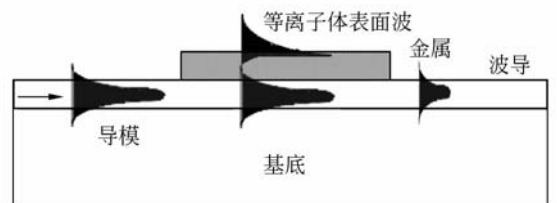


图 1 波导型 SPR 结构

Fig. 1 SPR structure of waveguide

## 3 离子交换单模波导的解析

对于 Ag<sup>+</sup>-Na<sup>+</sup> 交换, 设玻璃厚度沿着  $x$  轴正向, 在时刻  $t$ , 若熔融盐中 Ag<sup>+</sup> 的摩尔比  $\leq$

0.05%，将银离子浓度进行归一化之后的扩散方程可以写为

$$\begin{cases} \frac{\partial U_A(x,t)}{\partial t} = D_{\text{eff}} \frac{\partial^2 U_A(x,t)}{\partial x^2}, & x \geq 0, t \geq 0 \\ U_A(x=0,t) = 1 \\ U_A(x,t=0) = 0 \\ U_A(x \rightarrow \infty, t > 0) = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

其中  $D_{\text{eff}}$  为等效扩散系数,其解为余误差函数

$$U_A(x,t) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{D_{\text{eff}}t}}} \exp(-z^2) dz = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_{\text{eff}}t}}\right) = \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_{\text{eff}}t}}\right), \quad x \geq 0, t \geq 0, \quad (4)$$

式(4)中  $\operatorname{erf}(x)$  为误差函数,  $\operatorname{erfc}(x)$  为余误差函数,余误差函数渐变平面波导折射率分布可表示为

$$n(x) = n_s + \Delta n \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_{\text{eff}}t}}\right), \quad x \geq 0, t \geq 0, \quad (5)$$

这里,  $n_s$  是基板折射率,  $\Delta n$  是基板表面折射率增量. 由 WKB 方法得到导模本征方程

$$\int_0^{x_c} \sqrt{k_0^2 n^2(x) - \beta^2} dx = \left(m + \frac{1}{4}\right) \pi + \arctan \left[ \eta \frac{\sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_c^2}}{\sqrt{k_0^2 n^2(0) - \beta^2}} + \frac{k_0^2 n(0) \frac{dn(x)}{dx} \Big|_{x=0}}{2(\sqrt{k_0^2 n^2(0) - \beta^2})^3} - \xi \right], \quad (6)$$

$m = 0, 1, 2, \dots$

$\eta = 1, \xi = 0$  TE mode

$\eta = \frac{n^2(0)}{n_c^2}, \xi = \frac{\frac{dn(x)}{dx} \Big|_{x=0}}{n(0) \sqrt{k_0^2 n^2(0) - \beta^2}}$  TM mode

式中,  $\beta = k_0 n(x_c)$ .

若实验使用  $\text{AgNO}_3\text{-NaNO}_3$  混合熔融盐, 熔融盐中  $\text{Ag}^+$  的摩尔比  $\leq 0.05\%$ , 离子交换温度设为  $\theta$ , 交换时间为  $t$ . 实验测得平板波导 0 阶模和 1 阶模的传播常数分别是  $\beta_0$  和  $\beta_1$ , 由  $\beta = k_0 n(x_c)$  可以算出  $\beta_0$  和  $\beta_1$  对应的  $x_{c0}$  和  $x_{c1}$ , 代入式(6)得到两个方程, 未知量有两个, 分别是  $\Delta n$  和  $D_{\text{eff}}$ , 可以联立求出.

如果波导可以激励 3 个模(0 阶、1 阶和 2 阶模), 那么两两组合求解, 最后计算其平均值可以较好地反映事实结果(该方法可以推广到更多的

模式)。

由上述方法得的  $D_{\text{eff}}$  和  $\Delta n$  平均值即为所用玻璃中的有效扩散系数  $D_{\text{eff}}$  以及表面折射率增量  $\Delta n$ . 在制作条波导时, 离子交换实验条件保持不变, 即使用与制备平面波导时相同的混合熔融盐, 交换温度  $\theta$  相同, 所用玻璃也相同, 则  $D_{\text{eff}}$  和  $\Delta n$  也不变.

设离子交换的掩模开窗尺寸和坐标如图 2 所示, 二维离子交换中  $\text{Ag}^+$  的扩散方程可以写成

$$\frac{\partial U_A(x,y;t)}{\partial t} = D_{\text{eff}} \left[ \frac{\partial^2 U_A(x,y;t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_A(x,y;t)}{\partial y^2} \right], \quad (7)$$

$$x \geq 0, -\infty < y < \infty, t \geq 0$$

$$U_A(x=0,t) = \begin{cases} 1 & |y| < w \\ 0 & |y| > w \end{cases}$$

$$U_A(x,y;t=0) = 0$$

式  $U_A(x,y;t)$  定义为用表面开窗处的  $\text{Ag}^+$  的规格化浓度  $C_{A0}$  做归一化处理后的浓度(无量纲).

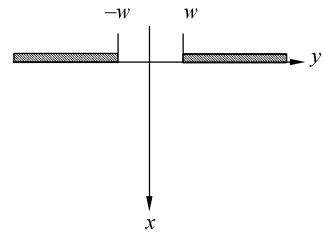


图 2 离子交换的掩模开窗尺寸和坐标

Fig. 2 Window size and coordinate for ion-exchange

利用格林函数法求解式(7)给出的边界问题和初始问题, 可以得到如下形式的解

$$U_A(x,y;t) = \frac{1}{\pi} \left(\frac{x}{d_{\text{eff}}}\right) \exp\left[-(x/d_{\text{eff}})^2\right] \int_{\frac{w}{d_{\text{eff}}}\left(\frac{y}{w}-1\right)}^{\frac{w}{d_{\text{eff}}}\left(\frac{y}{w}+1\right)} \frac{\exp(-\xi^2)}{(x/d_{\text{eff}})^2 + \xi^2} d\xi, \quad (8)$$

$$x \geq 0, -\infty < y < \infty, t \geq 0$$

式中  $\xi$  无量纲,  $d_{\text{eff}} = 2\sqrt{D_{\text{eff}}t}$ , 当离子交换时间  $t$  已知时, 式(8)是关于坐标  $x, y$  的函数.

余误差函数渐变条波导的折射率分布可表示成

$$n(x,y) = \begin{cases} n_s + \Delta n f(x,y) & x \geq 0, -\infty < y < \infty \\ n_c & x < 0 \end{cases}, \quad (9)$$

式中,  $f(x, y) = U_A(x, y; t)$

条波导折射率分布以及等效波导的建立可以用图 3 表示。

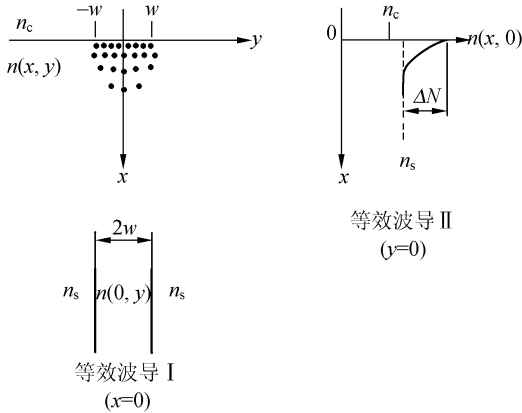


图 3 条波导折射率分布以及等效波导的建立  
Fig. 3 Refractive index distribution and establishment of equivalent waveguide

由于设计的条波导要用来激发等离子体表面波,因此,设计时以拟 TM 模作  $E_{pq}^x$  为设计条件,计算步骤如下。

对于等效波导 I,相当于 TE 模(电矢量与传播方向垂直的矢量),用式(10)求解  $p$  阶 TE 模的等效折射率  $N_1$ 。

$$2\omega k_0 \sqrt{n^2(0, y) - N_1^2} = (m+1)\pi - 2\arctan\left(\frac{\sqrt{n^2(0, y) - N_1^2}}{N_1^2 - n_s^2}\right), m=0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

$$\text{这里, } n(0, y) = \begin{cases} n_s + \Delta n, & |y| < w \\ n_s, & |y| > w \end{cases}$$

对于等效波导 II,相当于 TM 模,用式(11)求解  $q$  阶 TM 模的传播常数,该传播常数就是拟 TM 模的传播常数  $\beta_{pq}^x$ 。

$$\int_0^{x_c} \sqrt{k_0^2 n^2(x, 0) - \beta^2} dx = m\pi + \frac{\pi}{4} + \arctan\left\{ \frac{n^2(0, 0)}{n_c^2} \cdot \frac{\sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_c^2}}{\sqrt{k_0^2 n^2(0, 0) - \beta^2}} + \left( \frac{k_0^2 n(0, 0)}{2(\sqrt{k_0^2 n^2(0, 0) - \beta^2})^3} \cdot \frac{1}{n(0, 0)\sqrt{k_0^2 n^2(0, 0) - \beta^2}} \right) \frac{dn(x, 0)}{dx} \Big|_{x=0} \right\}, \quad (11)$$

$$\text{式中, } \frac{dn(x, 0)}{dx} \Big|_{x=0} = -\frac{2\Delta N}{\pi} \left\{ \frac{1}{w} \exp\left[-\left(\frac{w}{d_{\text{eff}}}\right)^2\right] + \frac{\sqrt{\pi}}{d_{\text{eff}}} \operatorname{erf}\left(\frac{w}{d_{\text{eff}}}\right) \right\}.$$

### 4 实验

#### 4.1 平面波导折射率的实测与拟合

平面波导离子交换使用 B270 ( $n_s = 1.520167, \lambda = 632.8 \text{ nm}$ ) 作为基板,交换温度为  $350^\circ\text{C}$ ,离子源质量百分比为  $0.1\% \text{ AgNO}_3 \sim 99.9\% \text{ NaNO}_3$ (此时摩尔比为  $0.0498\%$ ),采用 4 种不同的交换时间(4, 3, 2, 1 h)制备 4 片多模渐变波

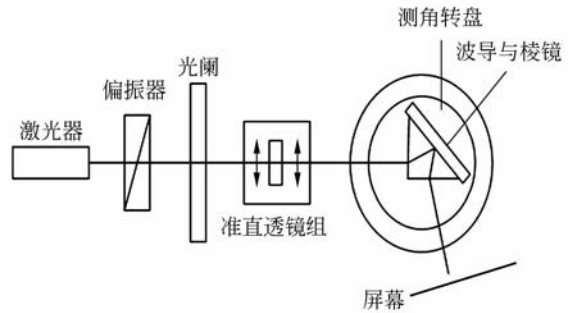
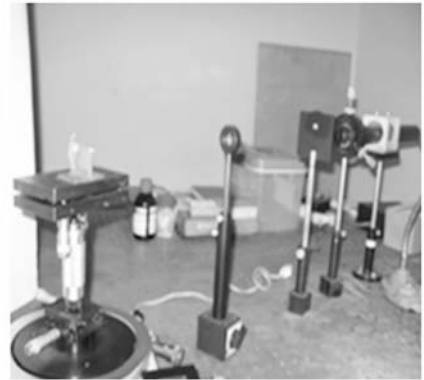


图 4 平面波导有效折射率测试装置图  
Fig. 4 Effective index test setup of planar waveguide

导。采用图 4 所示装置对平板波导各阶导模的有效折射率进行测试,并带入式(6)中进行联立求解,可确定平面波导的折射率分布为:

$$n(x) = 1.520167 + 0.027271 \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{5.140236 \times 10^{-16} t}}\right).$$

其中 3 h 离子交换波导的折射率分布曲线如图 5 所示。

图中交叉点是模折射率  $\beta/k_0$  的实测值,转移点由  $\beta = k_0 n(x_c)$  计算得到,数据吻合十分良好。实验证明用余误差函数能很好地拟合离子交换光波导折射率分布,实测值与拟合数据点的偏离很小。由于扩散系数只与扩散温度、熔盐组分、扩散

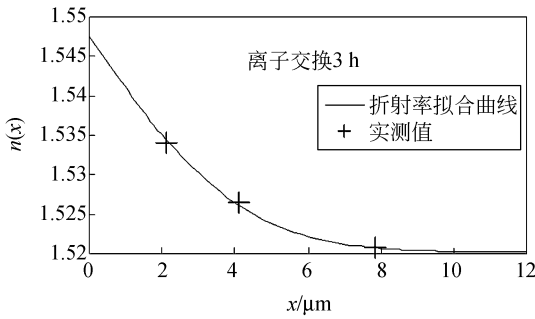


图 5 折射率分布的拟合结果

Fig. 5 Fitting results of refractive index distribution

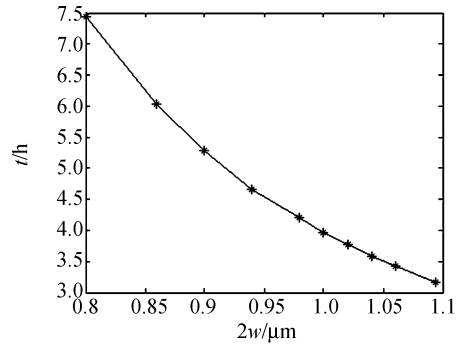


图 6 单模条件的设计结果

Fig. 6 Results of designing of single-mode conditions

时间有关,这里对 4 个片子的波导参数求平均,即可得到在固定工艺条件下(即离子交换温度  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,离子源配比  $0.049\text{ }8\%$ )的波导参数  $D_{\text{eff}}$  与  $\Delta n$ 。在此前提下,控制离子交换时间制备出离子交换单模条波导。

#### 4.2 离子交换单模条波导的设计与制备

相同的工艺条件下,平板波导的  $D_{\text{eff}}$  与  $\Delta n$  继续有效,已由上面实验测定。利用有效折射率法求得条波导的单模条件  $w$  和  $t$ ,以拟 TM 模的单模条件设计,即二维均为单模,  $n_c$  为上包层折射率。采用德国 B270 玻璃,相同工艺条件下,上包层折射率  $n_c=1$ ,则  $632.8\text{ nm}$  波长下的单模设计步骤为:(1)取  $N_l=\beta=k_0 n_s$  代入式(10),令  $m=1$  算出开窗半宽的最大值  $w_{\text{max}}=0.546\ 96\ \mu\text{m}$ ;(2)将  $2w_{\text{max}}$  代入式(10),令  $m=0$  计算出  $N_l=1.537\ 9$ ;(3)取  $\beta=k_0 n_s$  代入式(11), $m=1$  算出此时最大交换时间  $t_{\text{max}}=3.16\text{ h}$ 。在小于最大开窗宽度的情况下依次计算,结果如图 6 所示,在曲线下方区域选择掩模开窗宽度  $2w$  和离子交换时间  $t$  的组合可以得到单模条波导。

制备时玻璃上表面和两个侧面经光学抛光,上表面用真空镀膜技术制备了  $0.5\ \mu\text{m}$  厚的金属 Al 膜,采用光刻技术开窗,开窗宽度是  $1\ \mu\text{m}$ 。离子交换在  $0.1\% \text{ AgNO}_3 \sim 99.9\% \text{ NaNO}_3$  混合熔融盐中进行,交换温度是  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,保温时间是  $2\text{ h}$ 。导模激励采用了光纤—波导端面耦合自动调芯技术<sup>[10]</sup>,工作波长是  $632.8\text{ nm}$ 。单模特性采用 HAMAMATU 公司 C5840 模场分布测试仪测试,图 7 给出了模场分布的测试结果,显示了良好的单模特性。

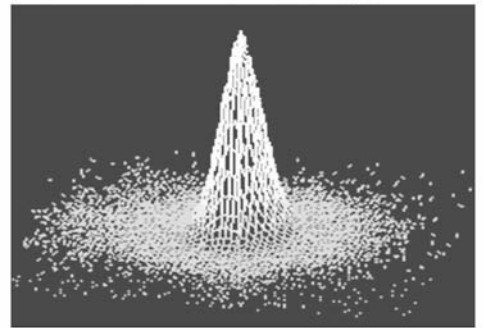


图 7 模场分布的测试结果

Fig. 7 Test results of mode field distribution

#### 4.3 等离子体表面波的激励

在制备的条波导上镀  $50\text{ nm}$ ,沿波导长度方向  $5\text{ mm}$  的金膜, $632.8\text{ nm}$  激光激励离子体表面波,测量条波导的导模传输功率。实验中制备的条形光波导的波导宽度很小,采用端面直接耦合

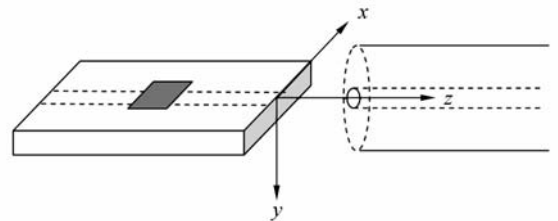


图 8 光纤与条形波导的端面耦合示意图

Fig. 8 Coupling diagram of optic fiber and stripe waveguide

方式如图 8 所示,搭建的光纤—光波导耦合测试系统如图 9 所示,主要包括稳压电源、高稳定光源、两套精密六维调整装置、波导固定用调整座、步进电机驱动的控制装置、高分辨率光功率计和计算机。光波导被固定于中间的三维手动调整座上,左右两侧的六维调整台分别用于固定输入光

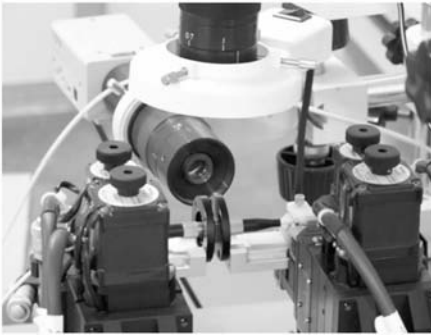


图 9 光纤—光波导耦合测试系统图

Fig. 9 Diagram of fiber-waveguide coupling test system

纤和输出光纤。六维调整台的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴和  $\theta_z$  转轴由步进电机驱动,另外两维由手动操作。调芯

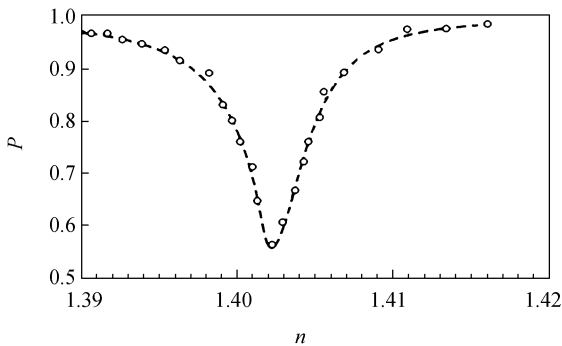


图 10 折射率与光强关系

Fig. 10 Relationship between refractive index and light intensity

时,光波导置于中间的固定台上,左右两侧的精密切六维调整台分别用于固定输入光纤和输出光纤。其中精密调整台的  $X$  轴、 $Y$  轴、 $Z$  轴、 $\theta_x$  转动轴、 $\theta_y$  转动轴和  $\theta_z$  转动轴由步进电机驱动,计算机通过 GPIB 接口通信卡将控制指令发送至步进电机控

## 参考文献:

- [1] 王悠悠,陈抱雪,邹任玲,等. 离子交换单模条波导的折射率分布控制与制备[J]. 光学仪器, 2010, 32(2):70-74.  
WANG Y Y, CHEN B X, ZOU R L, *et al.*. Control and preparation of ion-exchange single-mode strip waveguide refractive index distribution[J]. *Optical Instruments*, 2010, 32(2):70-74. (in Chinese)
- [2] 郝鹏,吴一辉. 基于噪声分析的波长表面等离子体共振分析仪的数据处理[J]. 光学精密工程, 2009, 17(9):2159-2164.

制器,实现六轴驱动控制。

采用上述装置对浓度为 40%~70% 的甘油溶液进行测试,其折射率为 1.384~1.428,将检测到的光强进行归一化处理,在折射率为 1.39~1.42 时归一化光强如图 10 所示。由于激发出等离子体表面波,所以折射率为 1.4018 处产生最大的衰减,与理论计算值吻合。采用这种方法,可以在一定的小范围内采用强度检测的方法实现折射率的测量,若采用白光光源和光谱仪实现波长扫描可以实现较大范围的折射率测量。

## 5 结 论

提出了实验确定  $\text{Ag}^+$ - $\text{Na}^+$  离子交换等效扩散系数和表面折射率增量的方法,通过制备 4 片多模平面波导,采用棱镜耦合法测试其模折射率,确定一定离子交换工艺条件下的波导参数值。导出离子交换条波导制备过程涉及的两维扩散方程的一般解,并拟合推定离子交换条波导的折射率分布。利用等效折射率法给出了单模波导条件,设计了相应的工艺参数,以光刻技术为核心在 0.1% $\text{AgNO}_3$ ~99.9% $\text{NaNO}_3$  混合熔融盐中制备了单模条波导,模场分布测试结果显示了良好的单模特性,在此波导上镀 50 nm 的金膜,采用不同折射率的甘油溶液进行测试,可激发等离子体表面波,采用此波导可进行传感。本文为条波导折射率分布提供了有效的拟合推定的方法,具有可在线测量、适应能力强、快速高效、准确、可靠性高、操作简便等特点。

- HAO P, WU Y H. Data process of spectroscopy surface plasmon resonance analyzer based on noise analysis[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9): 2159-2164. (in Chinese)
- [3] SLAVIK R, HOMOLA J, CRYROK J, *et al.*. Novel spectral fiber sensor based on surface plasmon resonance[J]. *Sensors and actuators B*, 2001, 80(2):106-111.
- [4] HOMOLA J, YEE S S, GAUG L. Surface plasmon resonance sensors review[J]. *Sensors and Actuators B*, 1999, 54:3-15.
- [5] 李大勇,曹振新,吴乐南,等. 光纤表面等离子体共

振传感检测系统中的数据分析[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(10): 1946-1949.

LI D Y, CAO ZH X, WU L N, *et al.*. Data analysis in the optical fiber surface plasmon resonance sensing systems [J]. *Electronic and Information Journal*, 2006, 28(10): 1946-1949. (in Chinese)

[6] DOSTALEK J, CTYROKY J, HOMOLA J, *et al.*. Surface plasmon resonance biosensor based on integrated optical waveguide[J]. *Sensors and Actuators B*, 2001, 76: 8-12.

[7] NELSON S G, JOHNSTON K S, YEE S S. High Sensitivity surface plasmon resonance sensor based on phase detection[J]. *Sensors and Actuators B*, 1996, 35-36: 187-191.

[8] 曹庄琪. 导波光学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.  
CAO ZH Q. *Guided Wave Optics*[M]. Beijing: Science Press, 2007.

[9] NOTCOVICH A G, ZHUK V, LIPSON S G. Surface plasmon resonance imaging[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, 39: 1665-1667.

[10] 隋国荣, 陈抱雪, 周建忠, 等. 基于中心积分法的 11 维集成光波导芯片封装系统[J]. 光学精密工程, 2007, 15(11): 1649-1655.

SUI G R, CHEN B X, ZHOU J ZH, *et al.*. 11D integrated optic waveguide chip packaging system based on center-integration algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11): 1649-1655. (in Chinese)

#### 作者简介:



刘 瑾(1978—), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 博士研究生, 讲师, 2004 年于燕山大学获得硕士学位, 主要从事光电检测及智能监控方面的研究。E-mail: fly-  
ingpine@sina.com



杨海马(1979—), 男, 河北邢台人, 博士研究生, 讲师, 2004 年于燕山大学获得硕士学位, 2009 年于中国科学院西安光机精密机械研究所攻读博士学位, 主要从事量子通信和智能控制方面的研究。E-mail: snowyhm@sina.com

#### 导师简介:



陈抱雪(1955—), 男, 浙江上虞人, 博士, 教授, 博士生导师, 1994 年于日本国立东京农工大学获博士学位, 主要研究方向为光电子技术、集成光学。E-mail: bxchen55@live.cn