

基于阵列波导光栅的高精度折射率传感器研究

王有斌 黄旭光

(华南师范大学光子信息技术广东省高校重点实验室, 广东 广州 510006)

摘要 设计和研究了基于阵列波导光栅的高精度折射率传感器。该传感器利用阵列波导光栅的阵列波导区域对相位差敏感的特性,通过在阵列波导区域挖槽来测量通过沟槽的液体的折射率变化。由于阵列波导之间的相位差变化会导致输出波导的输入面的最大光强位置的变化,所以通过入射窄带光源并计算其中两个输出波导的功率比的变化,就可以得到实时的折射率变化。利用傅里叶光学和光波动理论的方法建立数学模型,经过综合考虑各种因素,设计了合理的参数,通过拟合得到折射率变化和光功率比的解析式。这种方法能够有效地消除仪器的不稳定性、内部损耗和环境影响带来的测量误差,提高测量精度。

关键词 传感器; 阵列波导光栅; 折射率; 傅里叶光学

中图分类号 TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092909.2378

Study on the High-Accuracy Fluid Refractive-Index Sensor Based on an Arrayed-Waveguide Grating

Wang Youbin Huang Xuguang

(Laboratory of Photonic Information Technology, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract A high-accuracy fluid refractive-index sensor based on an arrayed-waveguide grating (AWG) is designed. This system measures the refractive-index of a fluid in the groove using the characteristic of the sensibility of the phase shift of arrayed-waveguides. The phase shifts of the arrayed waveguides (AWs) lead to the position change of the maximum of the light intensity in the image plane of the output slab. The high accuracy real-time refractive-index of the fluid can be obtained from the power rate between two output waveguides via a narrow band source. A mathematical model based on the theory of Fourier optics and wave optics is established with reasonable parameters and the consideration of every factor. The analytic expression of the relationship between the refractive-index of the fluid and the power rate is obtained via fitting. The method can eliminate the instability, the inner loss of the instrument and the measurement error caused by the environment to improve the measurement accuracy of refractive index.

Key words sensor; arrayed-waveguide grating (AWG); refractive-index; Fourier optics

1 引言

作为密集波分复用(DWDM)光通讯网络中的关键器件,阵列波导光栅(AWG)由其多功能性、低损耗、低串扰、高可靠性、尺寸小、设计灵活而得到了广泛应用。AWG器件的研究和制作相应地得到了

迅速的发展^[1,2]。并在传感系统中也逐渐得到应用^[3~5]。但很少有人将阵列波导光栅作为传感器件来使用,其实由于它的阵列波导(AWs)对相邻的相位差敏感性,可以将它制成具有高精度的传感器。目前,测量折射率的方法有多种,其中比较有代表性

收稿日期: 2008-11-12; **收到修改稿日期**: 2008-12-21

基金项目: 广东省自然科学基金(05200534)和广州科技计划(2006J12C0461)资助课题。

作者简介: 王有斌(1984—),男,硕士研究生,主要从事无源光通信器件及光纤传感等方面的研究。

E-mail: wyb_adam@163.com

导师简介: 黄旭光(1962—),男,教授,硕士生导师,主要从事微纳集成光通信器件及光纤传感等方面的研究。

E-mail: huangxg0@163.com

的是布儒斯特角法^[6,7]、临界角法或阿贝折光仪^[8]、椭圆偏仪^[9,10]、干涉法^[11,12]、最小偏向角法^[13,14]及 m-线波导测量法^[15]、光波导马赫-曾德尔(M-Z)干涉测量法^[16,17]、表面等离子体共振的反射传感技术^[18,19]、光纤光栅检测法^[20,21]、菲涅耳(Fresnel)反射^[22,23]等方法与技术。但这些方法的测量精度都不是很高。阵列波导光栅可以实现光波的复用和解复用,是因为不同波长的光束经过阵列波导部分后,相邻波导的相位差不同,所以最大光强的位置就会移动。同样地,如果入射光为单色光,但改变阵列波导的部分折射率,也会使得相邻波导的相位差发生变化。因此 AWG 是相位敏感器件,如果能将此特性应用到传感系统中,将会大大提高传感器的精确度。

利用傅里叶光学、光波动衍射理论的方法建立数学模型,改变 AWG 的部分参数,推导出用作传感器的挖槽 AWG 各个界面的解析式;对挖槽的 AWG 的结构参数进行了优化,讨论了最大光强的位置与各个参数的关系,选择不同输出波导对精确度的影响,非单色光源对精确度的影响,对折射率和功率比关系的曲线拟合以及减少由于沟槽宽度导致光发散的方法。

2 高精度折射率传感器的结构与原理

2.1 高精度折射率传感器的结构

如图 1 所示,为实现 AWG 对液体折射率的测量,将 AWG 的阵列波导区挖出一个三角型的区域,待测液体的折射率变化引起相邻阵列波导的相位差变化,从而使界面 4 的最大光强的位置移动,通过其中两个输出阵列波导的输出功率比计算液体折射率的变化。

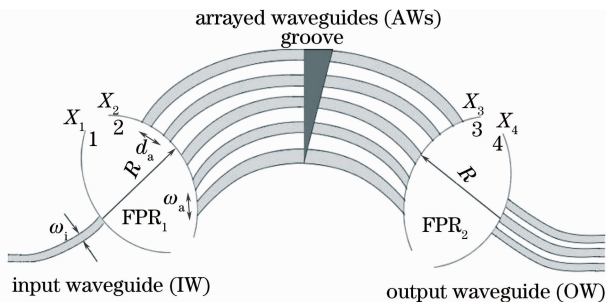


图 1 挖槽 AWG 结构图

Fig. 1 Structural diagram of AWG with a groove

2.2 挖槽后的阵列波导光栅各个面的函数

在弱波导情况下,阵列波导的输入模场可以用归一化的高斯函数表示^[24,25]:

$$E_1(x_1) = \sqrt{\frac{2}{\pi\omega_i^2}} \exp\left[-\left(\frac{x_1}{\omega_i}\right)^2\right], \quad (1)$$

式中 ω_i 为输入波导的模场半径。光在平板波导区产生夫琅禾费衍射,其输出场 $E_2(x_2)$ 正好是输入场 $E_1(x_1)$ 的空间傅里叶变换。光波在自由空间可视作无损传输,这样输入平板波导的输出光场为

$$E_2(x_2) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \mathcal{F}\{E_1(x_1)\}, \quad (2)$$

式中 $\alpha = \lambda R/n_s$, λ 为入射光所包含的任意波长分量, R 和 n_s 分别为平板波导的长度和有效折射率, \mathcal{F} 表示傅里叶变换。对于任意第 k 个阵列波导的模场横向分布可以用归一化高斯函数表示:

$$g_k(x_2 - kd_a) = \sqrt{\frac{2}{\pi\omega_a^2}} \exp\left[-\left(\frac{x_2 - kd_a}{\omega_a}\right)^2\right], \quad (3)$$

式中 ω_a 为阵列波导模场半径, d_a 为相邻阵列波导的间距。

设 $k=0$ 对应中心位置处的阵列波导, k 为正整数对应正半坐标轴上的波导, k 为负整数对应负半坐标轴上的波导,输出波导数 q 用类似的表示。将输入平板波导的出射光场和阵列波导的基模场的乘积进行积分,并考虑到相邻波导模场的交叠,可得到第 k 个阵列波导的光场耦合系数:

$$C_k = \frac{E_2(kd_a)}{1 + 2 \int_{-\infty}^{\infty} g_k(x_2) g_{k-1}(x_2) dx_2} \int_{-\infty}^{\infty} g_k(x_2) dx_2, \quad (4)$$

式中 $\int_{-\infty}^{\infty} g_k(x_2) g_{k-1}(x_2) dx_2$ 和 $\int_{-\infty}^{\infty} g_k(x_2) dx_2$ 为常量,即 C_k 与 $E_2(x_i)$ 是线性关系。

阵列波导与输出平板波导界面上的总光场分布为

$$E_3(x_3) = \sum_k C_k g_k(x_3 - kd_a) \exp(-j\varphi_{k,\lambda}), \quad (5)$$

式中 $\varphi_{k,\lambda}$ 为第 k 个阵列波导的相位。由于引入了三角形的液体折射率,光从入射端传到输出端,相邻波导引入的相位差为

$$\Delta\varphi_\lambda = \frac{2\pi}{\lambda} (\Delta L n_c + \Delta W_g n_x - \Delta W_g n_c), \quad (6)$$

式中 n_c 为阵列波导的有效折射率, n_x 为待测液体的折射率, ΔL 为挖槽之前相邻波导的长度差, ΔW_g 为相邻波导挖槽的宽度差。由(6)式可知,相邻波导的相位差还和输入波长 λ 有关,对于实际的光源,输入的光场还包含非中心波长的光波,所以会引起相位差的不稳定。首先假定要精确测量的待测液体折射

率为 n_{x_0} , 用 AWG 来监测其微小变化。为了减少相位差对光波长的敏感性并使 $n_x = n_{x_0}$ 时, 输出波导的输入面的最大光强落在中心, 应当满足

$$\Delta L n_c + \Delta W_g n_{x_0} - \Delta W_g n_c = 0. \quad (7)$$

由此当 n_x 在 n_{x_0} 附近变化时, 可以将具有一定带宽的光源对相位差的影响降至最低。为了满足(7)

式, 如果 $n_{x_0} < n_c$, 则挖槽是倒三角形(如图1)。但当 $n_{x_0} > n_c$ 时, 挖槽是正三角形。

根据前面的分析可知, 光在平板波导区的输出光场正好是输入场的能量傅里叶变换, 将(5)式进行傅里叶变换得到输出平板波导焦平面的光场分布为:

$$E_4(x_4) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \mathcal{F}[E_3(x_3)] = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} g_k(x_2) dx_2}{1 + 2 \int_{-\infty}^{\infty} g_k(x_2) g_{k+1}(x_2) dx_2} \sqrt{\frac{4\pi^2 \omega_i^2 \omega_a^2}{\alpha^4}} \exp\left(-\frac{\pi^2 \omega_a^2 x_4^2}{\alpha^2}\right) \times \sum_k \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda} [l_0 n_c + (\Delta L n_c + \Delta W_g n_x - \Delta W_g n_c) k]\right\} \exp\left[-\left(\frac{\pi \omega_i k d_a}{\alpha}\right)^2\right] \exp\left(-j \frac{2\pi k d_a x_4}{\alpha}\right), \quad (8)$$

式中, l_0 为最短的阵列波导长度。

设任意第 q 个输出波导模场横向分布为

$$g_q(x_4 - qd_0) = \sqrt{\frac{2}{\pi \omega_0^2}} \exp\left[-\left(\frac{x_4 - qd_0}{\omega_0}\right)^2\right], \quad (9)$$

式中 d_0 , ω_0 分别为相邻输出波导的间距和输出波导的模场半径。由于输出波导的间距比较小, 所以应该考虑到模场叠加的问题。这类似阵列波导输入面的情况, 第 q 个输出波导的光场耦合系数为

$$\eta_q = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} E_4(x_4, \lambda) g_q(x_4) dx_4}{1 + 2 \int_{-\infty}^{\infty} g_q(x_4) g_{q-1}(x_4) dx_4}, \quad (10)$$

因此, 第 q 个输出波导的输出能量为

$$P_q = |\eta_q|^2 = \frac{2\omega_i \omega_a \omega_0 \pi \sqrt{2\pi}}{\pi^2 \omega_0^2 \omega_a^2 + \alpha^2} \left[\frac{\int_{-\infty}^{\infty} g_n(x_2) dx_2}{1 + 2 \int_{-\infty}^{\infty} g_n(x_2) g_{n-1}(x_2) dx_2} \right]^2 \times \exp\left(\frac{-2\pi^2 \omega_a^2 d_0^2 q^2}{\pi^2 \omega_a^2 \omega_0^2 + \alpha^2}\right) \frac{1}{\left(1 + 2 \int_{-\infty}^{\infty} g_q(x_4) g_{q-1}(x_4) dx_4\right)^2} \times \left| \sum_k \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda} [l_0 n_c + (\Delta L n_c + \Delta W_g n_x - \Delta W_g n_c) k]\right\} \exp\left[-\left(\frac{\pi \omega_i k d_a}{\alpha}\right)^2 - \frac{\pi^2 \omega_0^2 d_a^2 k^2 + j 2\pi \alpha q d_a d_0 k}{\pi^2 \omega_a^2 \omega_0^2 + \alpha^2}\right] \right|^2. \quad (11)$$

为了获得待测液体的折射率, 选取输出波导的两个通道, 测量它们的功率值 P_i 和 P_j , 然后进行相除运算 $R_{\text{rate}} = P_i/P_j$, 得到 R_{rate} 和 n_x 的关系。这种方法可以有效地消除仪器的不稳定性、内部损耗和环境影响带来的测量误差, 提高测量精度。

3 高精度折射率传感器的参数优化

3.1 输出平板波导的输出光场最大光强的位置与各个参数的关系

由(8)式可知, 在输出波导的输入面光强的最大值是由求和项

$$\sum_k \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda} [l_0 n_c + (\Delta L n_c + \Delta W_g n_x - \Delta W_g n_c) k]\right\} \exp\left[-\left(\frac{\pi \omega_i k d_a}{\alpha}\right)^2\right] \exp\left(-j \frac{2\pi k d_a x_4}{\alpha}\right), \quad (12)$$

决定,于是做推导:

$$\sum_k \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda} [l_0 n_c + (\Delta L n_c + \Delta W_g n_x - \Delta W_g n_c) k]\right\} \exp\left[-\left(\frac{\pi \omega_i k d_a}{\alpha}\right)^2\right] \exp\left(-j \frac{2\pi k d_a x_4}{\alpha}\right) = \sum_k \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda} [l_0 n_c + (\Delta L n_c + \Delta W_g n_{x0} - \Delta W_g n_c) k]\right\} \times \exp\left[-\left(\frac{\pi \omega_i k d_a}{\alpha}\right)^2\right] \exp\left[-j \frac{2\pi k d_a}{\alpha} \left(\frac{\Delta W_g \alpha (n_x - n_{x0})}{\lambda d_a} + x_4\right)\right]. \tag{13}$$

假定入射光 $\lambda = \lambda_0$, 比较(12)、(13)式可知最大光强的位置为

$$x_{4max} = \frac{\Delta W_g \alpha (n_{x0} - n_x)}{\lambda d_a} = \frac{\Delta W_g R (n_{x0} - n_x)}{n_s d_a}. \tag{14}$$

3.2 传感器参数的优化

通过观察以上的推导可以发现,为了实现对待测液体折射率的敏感性,需要增大 ΔW_g 的值,阵列波导的数量也需要尽量多,但是这样就会导致器件较大。挖槽过宽又会使波导中光产生衍射,导致能

量的损失,使传感性能变差。所以综合考虑各种因素,设计了如表 1 的参数值,这里假设该器件是用来监测纯净水折射率的微小变化。此设计可以测量 10^{-7} 量级的折射率变化,如果对精度要求不高,可以适当减小挖槽的宽度。

表 1 设计使用的参数

Table 1 The parameters used in the design

Parameters	Symibol	Value
Central wavelength	λ_0 / nm	1550.9
Core index	n_1	1.4554
Clad index	n_2	1.4445
Effective index of AWs	n_c	1.4502
Effective index of the slab regions	n_s	1.4528
Spacing of AWs	$d_a / \mu\text{m}$	15
Spacing of output waveguides (OWs)	$d_o / \mu\text{m}$	15
Length of input & output slab waveguide	$R / \mu\text{m}$	47348
Number of AWs	N	51
Half width of input waveguides (IWs)	$a / \mu\text{m}$	7
Width of OWs	$w_o / \mu\text{m}$	10
Width of IWs	$w_a / \mu\text{m}$	10
Number of output channels	N_o	33
Diffraction order	m	60
Relative index difference	$\Delta n_r / \%$	0.75
Length difference between two neighboring AWs	$\Delta L / \mu\text{m}$	64.166
groove width	$\Delta W_g / \mu\text{m}$	690.37
Refractive index of the ideal liquid	n_{x0}	1.315421

由于对 ΔW_g 和阵列波导数量的限制,在输出平板波导的输出面光场变得相对扁而宽。如果选取相邻的两个输出波导作为监测波导,则当 n_x 变化时,它们的比值 R_{rate} 变化不明显。为了增加灵敏度,选择相隔 3 个输出波导的两个波导计算功率比。例如,当最大光强靠近中心输出波导,在其负方向时,选取第 -4 个输出波导的输出功率比较,即 $R_{rate} = P_0 / P_{-4}$ 。 R_{rate} 和 n_x 的关系如图 2 所示。

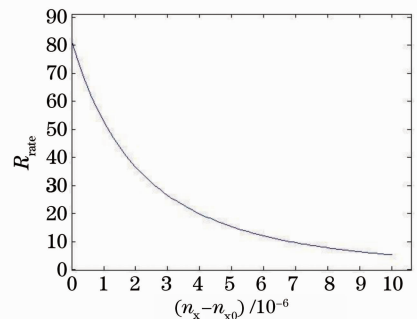


图 2 功率比 R_{rate} 随折射率 $n_x - n_{x0}$ 的变化
Fig. 2 Power rate versus relative index difference

由图 2 可知,当 $n_x - n_{x0} < 5 \times 10^{-6}$, 曲线斜率较大,功率比对折射率的变化比较敏感。为了保证

测量的准确性,经过对器件的设计,当 $n_x - n_{x0} = 5 \times 10^{-6}$ 时,可以通过表 1 使用(14)式算出最大光强刚好落在输出波导 0 与 -1 中间。所以当 $5 \times 10^{-6} < (n_x - n_{x0}) < 10 \times 10^{-6}$ 时,选用输出波导 -1 和 3 进行监测,即 $R_{\text{rate}} = P_{-1}/P_3$ 。这样可以保证每次测量时都使用斜率大的那一段曲线,从而使测量更加精确,如图 3 所示。

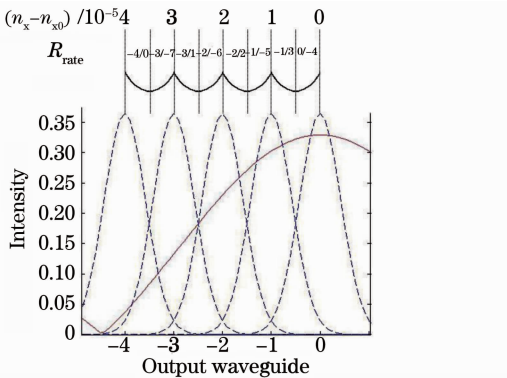


图 3 不同折射率选择的输出波导

Fig. 3 Output waveguide selected with different refractive index

3.3 不同输出波导对精确度的影响

由(8)式可以看出,由于因子 $\exp(-\pi^2 \omega_x^2 x_1^2 / \alpha^2)$ 的影响,在界面 4 的整体输出光强向两边减小。所以当最大光场移开中心时,其两边的光场不是完全对称的。这样对于选定的不同对输出波导的功率比与折射率变化的关系曲线并不完全重合。由于该因子是指数函数,所以越靠两边这种情况将会越严重。当 $0 < (n_x - n_{x0}) < 5 \times 10^{-6}$ 与 $120 \times 10^{-6} < (n_x - n_{x0}) < 125 \times 10^{-6}$ 时,选取的测量波导分别是 P_0/P_{-4} 与 P_{-12}/P_{-16} 。如图 4,在斜率最大的地方 ($n_x = n_{x0}$),误差最大为 0.5。但是对于折射率间隔为 1×10^{-7} 的两点,功率比有 4.0 左右的间隔;而在

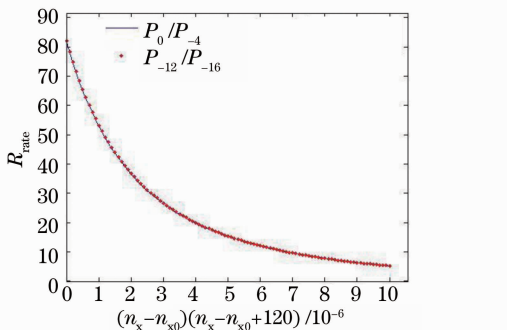


图 4 选择不同对的输出波导对精确度的影响

Fig. 4 The effect of different output waveguide on precision

$n_x - n_{x0} = 5 \times 10^{-6}$ 的地方,误差最大为 0.1,这时对于折射率间隔为 1×10^{-7} 的两点的功率比相差 0.4。所以可以通过对数据取中间值和量化来消除这个误差。

由于本设计使用 33 个输出端口的 AWG,因此其对折射率变化的测量范围为 $-1.3 \times 10^{-4} < (n_x - n_{x0}) < 1.3 \times 10^{-4}$ 。

3.4 非单色光源对精确度的影响

任意一个光源发射的光都不是一个真正的单色光,同时也包含一些波长相近的光,这里采用高斯光束表示。因为光源的强度是包含多个波长的光强度的总和,所以第 q 个波导输出光的强度应当将(11)式进行对波长的积分:

$$P'_q = \int_{-\infty}^{\infty} P_q(\lambda) g_\lambda(\lambda - \lambda_0) d\lambda, \quad (15)$$

$$g_\lambda(\lambda - \lambda_0) = \sqrt{\frac{2}{\pi \omega_\lambda^2}} \exp\left[-\left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\omega_\lambda}\right)^2\right], \quad (16)$$

式中 $\omega_\lambda = 0.1 \text{ nm}$ 。图 5 为实际的非单色光源和理想的单色光源的比较。由于(7)式的规定,使波长对输出功率的影响大大降低,可见,对于 $\omega_\lambda = 0.1 \text{ nm}$ 的高斯光源,基本不会影响对折射率变化的精确测量。

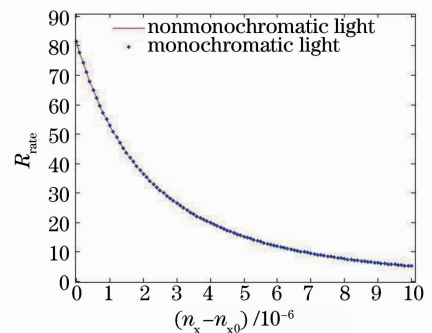


图 5 非单色光与单色光功率比随折射率差变化

Fig. 5 Power rates of nonmonochromatic and monochromatic light versus refractive index difference

3.5 功率比和折射率变化曲线的拟合

为了实现使用光功率比来计算折射率的变化,则需要得到一个解析式。由于(11)式比较复杂,无法推导出一个解析式。因此通过对曲线的拟合,可以找到很好描述功率比和折射率变化关系的函数:

$$R_{\text{rate}} = a \exp[-b(n_x - n_{x0})] + c. \quad (17)$$

经过拟合,可以得到 $a = 56.85$, $b = 438518.59$, $c = 8.14$ 。如图 6 所示。

由于制作工艺和环境的影响,这些参数需要根据具体的器件进行定义。因为方程中有 3 个参数

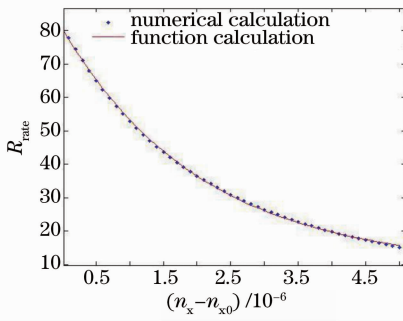


图 6 功率比和折射率变化的拟合曲线

Fig. 6 The fitting of power rate versus refractive index difference

(a, b, c), 需要得到 3 个点的值, 方程组才有解。通过逐渐改变待测液体的折射率, 来得到这 3 点的功率比。第 1 点: 让中心通道的功率达到最大值, 此时

$n_x - n_{x0} = 0$; 第 2 点: 当输出波导 0 和输出波导 -1 的功率相等的时候, 由(14) 可知, x_1 和 n_x 成线性关系, 此时 $n_x - n_{x0} = 5 \times 10^{-6}$; 第 3 点: 因为 b 是一个很大的数, 所以当 $n_x - n_{x0}$ 也比较大时, $\exp[-b(n_x - n_{x0})] = 0$, 此时 $R_{rate} = c$ 。

3.6 减少由于沟槽宽度导致光发散的方法

设计相邻阵列波导的沟槽宽度差为 $690.37 \mu\text{m}$ 。随着阵列波导序号的上升, 这个宽度会越来越大, 波导中的光束会在沟槽里发散。以至于不能将全部的光传输到对应的波导里, 产生了损耗, 降低了器件的性能。因此, 为了减少损耗, 将槽分成若干个小块^[26], 如图 7 所示, 将三角形沟槽分成若干个间隔相等的小块, 可以大大地减少由于光的发散带来的损耗。

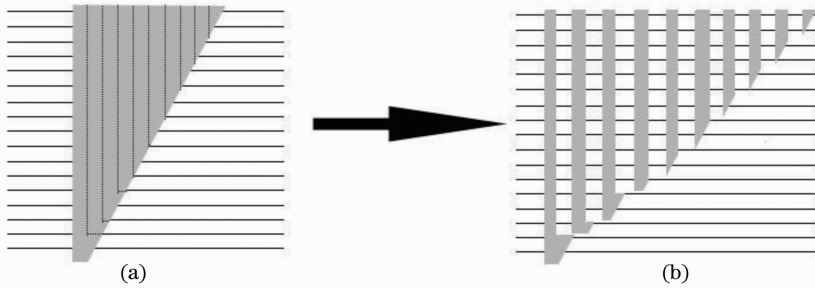


图 7 将沟槽分成小块减少光的发散

Fig. 7 New groove designed for reducing loss

4 结 论

设计和研究了使用阵列波导光栅构成的高精度折射率传感器。由于阵列波导光栅的阵列波导区域对相位差敏感, 所以在阵列波导区域进行挖槽, 使用窄带光源测量通过沟槽的液体的折射率变化。为了提高灵敏度, 需要增加挖槽的宽度, 但这又同时增加了器件的大小, 以及会导致器件的性能变差, 所以使用将挖槽分块和选取非相邻的波导作为探测波导的方法来降低损耗和提高灵敏度。通过对参数的优化以及选用合适的方法来实现对折射率的高精度测量, 具有一定的实用价值。

参 考 文 献

- 1 Geon Jeong, Donghoon Kim, Junseok Choi *et al.*. Low-loss compact arrayed waveguide grating with spot-size converter fabricated by a shadow-mask etching technique [J]. *ETRI Journal*, 2005, **27**(1): 89~94
- 2 S. Kamei, K. Iemura, A. Kaneko *et al.*. 1.5% athermal arrayed-waveguide grating multi /demultiplexers with very low loss groove design [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(3): 560~588

- 3 D. Robertson, P. Niewczas, J. R. McDonald. Interrogation of a dual fiber Bragg grating sensor using an arrayed waveguide grating [C]. *SPIE*, 2005, **5855**: 844~847
- 4 David C. C. Noram, David J. Webb, Ralf D. Pechstedt. Interferometric and fiber Bragg grating sensor interrogation using an arrayed waveguide grating[C]. *SPIE*, 2004, **5459**: 101~108
- 5 F. G. Sun, G. Z. Xiao, Z. Y. Zhang *et al.*. Modeling of arrayed waveguide grating for wavelength interrogation application [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **271**(1): 105~108
- 6 N. Kejalakshmy, K. Srinivasan. Simple method of Brewster-angle measurement for the determination of refractive indices in transparent biaxial crystal [J]. *Opt. Eng.*, 2001, **40**(11): 2594~2597
- 7 Yin Xin, Zhang Huaijin. A simple method for measuring refractive indices of crystals-Brewster's angle method [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optic*, 1998, **20**(5): 344~346
- 尹 鑫, 张怀金. 测量晶体折射率的一种简单方法-布儒斯特角法[J]. *压电与声光*, 1998, **20**(5): 344~346
- 8 J. R. Castrejon-Pita, A. Morales, R. Castrejon-Garcia. Critical angle laser refractometer [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, **77**(3): 035101
- 9 Chen Lan, Mo Dang. An overview and prospect on modern spectroscopic ellipsometry [J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 1999, **16**(1): 19~23
- 陈 篮, 莫 党. 现代椭圆偏光谱学的回顾与展望[J]. *光谱实验室*, 1999, **16**(1): 19~23
- 10 Sun Shunming, Zhang Liangying, Yao Xi. Principles of ellipsometry and its applications in the characterization of

- functional thin films [J]. *Piezoelectric & Acousto-optics*, 1998, **20**(3): 209~213
- 孙顺明, 张良莹, 姚 熹. 椭偏技术的原理及其在功能薄膜表征中的应用[J]. *压电与声光*, 1998, **20**(3): 209~213
- 11 C. H. Cho, J. Urquidi, Gregory I. Gellene *et al.*. Mixture model description of the T-, P dependence of the refractive index of water [J]. *J. Chem. Phys.*, 2001, **114**(7): 3157-3162
- 12 Hao Dianzhong, Wu Fuquan, Kong Weijin. Measurement of refractive index of crystals with interferometry [J]. *Laser Technology*, 2003, **27**(5): 407~408
- 郝殿中, 吴福全, 孔伟金. 干涉法测量晶体的折射率[J]. *激光技术*, 2003, **27**(5): 407~408
- 13 M. Munoz Uribe, C. E. M. de Oliveira, J. H. Clerice *et al.*. Measurement of refractive index of GaSb (1.8 to 2.56 μm) using a prism [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(3): 262~264
- 14 Zhou Tang, Zhang Daofan, Yang Huaguang *et al.*. Measurement of refractive index of the crystal with angle of minimum deviation method [J]. *J. Synthetic Crystals*, 1997, **26**(3-4): 377
- 周 棠, 张道范, 杨华光等. 用棱镜最小偏向角法测量晶体折射率[J]. *人工晶体学报*, 1997, **26**(3-4): 377
- 15 Huang Zuohua, He Zhenjiang. The optical methods for measuring the thickness and refractive index of thin films [J]. *Modern Scientific Instrument*, 2003, **4**(1): 42~44
- 黄佐华, 何振江. 测量薄膜厚度及其折射率的光学方法[J]. *现代科学仪器*, 2003, **4**(1): 42~44
- 16 Li Maohe, Zhang Meidun. Refractive index measurement by optical fiber Michelson interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(9): 1294~1296
- 李毛和, 张美敦. 用光纤迈克尔逊干涉仪测量折射率[J]. *光学学报*, 2000, **20**(9): 1294~1296
- 17 Chu Fenghong, Han Xiuyou, Pang Fufei *et al.*. Research development of integrated-optical waveguide sensors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(3): 21~27
- 初凤红, 韩秀友, 庞拂飞等. 集成光波导传感器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(3): 21~27
- 18 Kyung Hun Yoon, Michael L. Shuler, Sung June Kim. Design optimization of nano-grating surface plasmon resonance sensors [J]. *Optics Express*, 2006, **14**(1): 4842~4849
- 19 Qiu Hao, Liang Dakai, Zhang Huanchun *et al.*. Research on the surface plasmon resonance fiber optic sensor for cure monitoring [J]. *Chinese J. Lasers.*, 2002, **A29**(6): 545~549
- 邱 浩, 梁大开, 张焕春等. 光纤表面等离子体波传感器用于固化监测的研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(6): 545~549
- 20 Rao Yunjiang, Mo Qiuju, Zhu Tao. A novel-high sensitivity refractive index sensor with temperature self-compensating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 264~268
- 饶云江, 莫秋菊, 朱 涛. 一种新型温度自补偿高灵敏度折射率计[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 264~268
- 21 Guan Shouhua, Yu Qingxu, Song Shide. Experimental study on concentration sensor based on long-period fiber grating with single head [J]. *Chinese J. Sensors and Actuators*, 2005, **18**(3): 653~656
- 关寿华, 于清旭, 宋世德. 基于单端长周期光纤光栅的浓度传感器[J]. *传感技术学报*, 2005, **18**(3): 653~656
- 22 Hui Su, Xu Guang Huang. Fresnel-reflection-based fiber sensor for on-line measurement of solute concentration in solutions [J]. *Sensor. Actuat. B: Chem.*, 2007, **126**(2): 579~582
- 23 Yi Ting Wu, Xu Guang Huang, Hui Su. A quasidistributed fiber optic sensor for solute concentration measurement based on Fresnel reflection [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(13): 131101
- 24 J. W. Goodman. Introduction to Fourier Optics [M]. New York: McGraw-Hill, 1998
- 25 P. Munoz, D. Pastor, J. Capmany. Modeling and design of arrayed waveguide gratings [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(4): 661
- 26 A. Kaneko, S. Kamei, Y. Inoue *et al.*. Athermal silica-based arrayed-waveguide grating (AWG) multi-/demultiplexers with new low loss groove design [J]. *Electron Lett.*, 2000, **36**(4): 318~319