

# 用于微型拉曼光谱仪分光芯片的阵列波导光栅研究进展

许英朝<sup>1,2</sup> 王清娜<sup>1,2</sup> 林洪沂<sup>1,2</sup> 朱文章<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>厦门理工学院光电与通信工程学院, 福建 厦门 361024

<sup>2</sup>福建省光电信息材料与器件重点实验室, 福建 厦门 361024

**摘要** 微型拉曼光谱仪的核心部件是分光芯片, 研制出适应微型拉曼光谱仪微型化、加工精度高、成本低的新型分光芯片对于打破目前的国外技术专利封锁, 获得属于我国的自主知识产权具有重要意义。将本来诞生于光通信领域的阵列波导光栅用于微型拉曼光谱仪是研究的新思路, 其具有尺寸小、精度高、工艺简单、易于批量生产的优点。总结介绍了用于微型拉曼光谱仪分光芯片的阵列波导光栅在国内外的研究进展, 并且作了相应的分析, 提出了一定的改进方法。

**关键词** 集成光学; 拉曼光谱仪; 阵列波导光栅; 相位误差; 宽带宽; 插入损耗

中图分类号 TN256

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP52.050002

## Research Progress on Arrayed Waveguide Grating Chip for Micro Raman Spectrometer

Xu Yingchao<sup>1,2</sup> Wang Qingna<sup>1,2</sup> Lin Hongyi<sup>1,2</sup> Zhu Wenzhang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Opto-Electronics and Communication Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen, Fujian 361024, China

<sup>2</sup>Fujian Provincial Key Laboratory of Optoelectronic Information Materials and Devices, Xiamen University of Technology, Xiamen, Fujian 361024, China

**Abstract** The core component of the micro Raman spectrometer is its spectroscopic chip. It has the important meaning to develop the new spectroscopic chip the micro Raman spectrometer with microminiaturization, high machining accuracy and low cost. This work can help us to break the current foreign technology patent blockade and obtain intellectual property rights of our own country. Arrayed waveguide grating is originally used in the optical communication field. It is a new thought to arrayed waveguide grating as the spectroscopic chip for the micro Raman spectrometer. Arrayed waveguide grating has the advantages of small size, high precision, simple processing, and easy to mass production. The research progress on arrayed waveguide grating chip for micro Raman spectrometer at home and abroad is described and the corresponding analysis is made. In addition, an improved method is proposed for arrayed waveguide grating used for spectroscopic chip.

**Key words** integrated optics; Raman spectrometer; arrayed waveguide grating; phase error; broad bandwidth; insertion loss

**OCIS codes** 130.2790; 130.3120; 230.3120

## 1 引言

无论是2008年三鹿奶粉的“三聚氰胺事件”, 还是2011年12月底蒙牛纯牛奶的“致癌物黄曲霉毒素M1超标事件”, 食品安全事件引起了国人的担忧、质检部门的重视, 同时也引起了科研工作者研制快速、准确、便携的微型拉曼光谱仪的极大兴趣<sup>[1]</sup>。微型拉曼光谱仪的核心元器件是其分光芯片, 此方面的研究国内外起步时间比较接近, 且仪器原理、结构、设计思路和专利技术与发达国家研制的大型拉曼光谱仪有本质不同, 目前已迅速发展成为一个令人关注的新兴研究方向, 并有望获得属于我国的知识产权。

收稿日期: 2014-10-17; 收到修改稿日期: 2014-12-19; 网络出版日期: 2014-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(11304259)、福建省教育厅A类科技计划项目(JA12254, JA11228)

作者简介: 许英朝(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事集成光学方面的研究。E-mail: yexu@xmut.edu.cn

对于微型拉曼光谱仪的外光路,国内已有相关的研究报道<sup>[2]</sup>;对于微型拉曼光谱仪的核心器件分光芯片,国内除了采用微机电系统(MEMS)的可变光栅或可动透镜和采用法布里-珀罗(F-P)腔分光仪芯片<sup>[3]</sup>两种主要工艺路线之外,采用阵列波导光栅(AWG)作为分光芯片已成为目前的研究热点。而如何拓展其波长范围(增大带宽)和降低相位误差是其应用研究中亟待解决的问题。本文介绍了国内外用于微型拉曼光谱仪分光芯片的阵列波导光栅的研究进展情况,并给出了一定的器件改进思路。

## 2 阵列波导光栅分光芯片简介

阵列波导光栅是波分复用技术领域主要采用的光无源器件<sup>[4]</sup>,其结构如图1所示。两个平板波导( $S_1, S_2$ )之间为阵列波导,阵列波导中相邻光波导长度的阶梯变化可以产生光程差,使得光信号在平板波导 $S_2$ 中发生衍射,使具有不同波长的光分别进入 $N$ 个输出波导中,从而实现了分光功能。AWG通过不同长度但具有相同长度差的阵列波导实现了光程差,故不需要较大的焦距便可获得微型拉曼光谱仪所需要的高分辨率,从而获得微型、低成本、高性能的分光芯片。

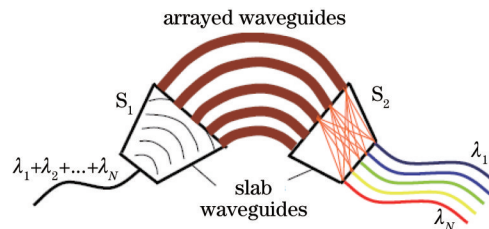


图1 阵列波导光栅波分复用器的结构示意图

Fig.1 Sketch diagram of the arrayed waveguide grating multiplexer

然而,把本来诞生于光纤通信领域的 AWG<sup>[5-6]</sup>应用于微型拉曼光谱仪的分光芯片,需要从不同的角度开展大量的理论基础研究和应用技术研究。AWG 用于光通信领域和用于微型拉曼光谱仪分光芯片的区别在于:1) 工作波长不同。光通信波分复用器工作在 1550 nm 波段的几个到几十个纳米的波长范围,而拉曼光谱仪的工作波长范围一般为 800~1000 nm;2) 光通道数目不同。波分复用器一般是几十路最多可至上百路,而光谱仪中 AWG 的通道至少需要上百路;3) 对相位误差要求不同。传统的光通信用 AWG,由于工作波长范围很窄,相位误差的影响尚不是很明显;对于拉曼光谱仪用的 AWG,工作波长范围为上百纳米甚至几百纳米,故相位误差造成的影响将十分明显,不利于微型拉曼光谱仪对微弱光的检测。因此,研制微型拉曼光谱仪所需要的核心分光芯片 AWG,必须要对其进行全新的结构设计;4) 对波长分辨率要求不同,波分复用器中对波长分辨率的要求的典型值为 0.2 nm,而目前通用的拉曼光谱仪用分光芯片的波长分辨率要求为 1 nm 左右。显然 AWG 用作微型拉曼光谱仪分光芯片有利于提高分辨率。5) 带宽宽度不同。密集波分复用系统中的 AWG 工作带宽仅仅十几纳米或者几十纳米,而 AWG 应用于微型拉曼光谱仪中,工作带宽则要求在上百纳米甚至 200 nm 的带宽范围,这样才能保证检测足够多的物质种类。

## 3 国内外研究现状

分光芯片是微型拉曼光谱仪的核心部件,采用阵列波导光栅作为微型拉曼光谱仪的分光芯片,具有良好的应用前景和市场价值,目前越来越多的研究小组对此产生了浓厚的研究兴趣,并且做了大量的尝试和探索工作。

### 3.1 用于微型拉曼光谱仪分光芯片的 AWG 研究进展

如加拿大 National Research Council 的 Cheben 等<sup>[7]</sup>在绝缘体硅结构(SOI)芯片上制作了 100 通道的 AWG 光谱仪芯片,其工作中心波长为 1545 nm,光谱分辨率达到了 0.2 nm,器件尺寸为 8 mm×8 mm(如图2所示,图2中 FSR 表示自由光谱范围)。日本女子大学的 Kodate 等<sup>[8]</sup>研制了微型 AWG 光谱芯片,实现了激光二极管、AWG 分光芯片和探测器的混合集成,成功用于环境水样中的叶绿素监测(如图3所示)。

然而上述采用的 AWG 作为微型拉曼光谱仪的研究方案,都是采用传统的轴对称形式的“马蹄形”器件结构,这种器件结构会使得不同 AWG 输出波导间产生相位误差<sup>[9]</sup>。产生的原因是因为不同的阵列波导弯曲部分不同,弯曲半径也不同,在光线经过的每一个弯曲部分都对应于一个有效折射率,这个有效折射率是弯

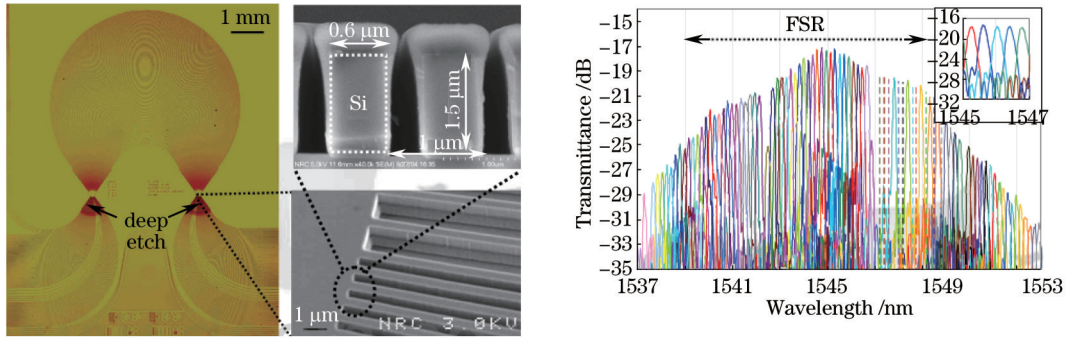


图2 工作波长 1537~1553 nm 的 100 通道 AWG 分光芯片的显微图片和测试谱

Fig.2 Optical microphotograph of a 100-channel SOI AWG spectrometer chip and the measurement spectra at the wavelength from 1537 nm to 1553 nm

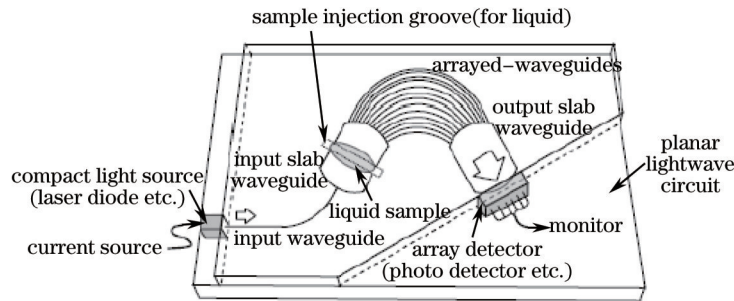


图3 AWG 光谱仪芯片用于水样中叶绿素浓度的监测

Fig.3 AWG spectrometer chip used in the monitoring of chlorophyll concentration in the water samples

曲半径的函数。虽然通常情况下,直波导中和弯曲波导中的有效折射率的差异是很小的(在  $10^{-5} \sim 10^{-4}$  数量级),但是当阵列波导弯曲一个较大的角度(如  $180^\circ$ ),这时的弯曲半径非常小,尤其对于工作波长范围较宽的微型拉曼光谱仪用 AWG 来讲,由此产生的相位误差将会十分显著,其结果是造成边缘通道的插入损耗非常大,这对于力求高分辨率、高准确性的微型拉曼光谱仪来说,是需要避免的。

Adar 等<sup>[10]</sup>提出过一种 S 型的宽带阵列波导光栅,此 AWG 布局示意图如图 4 所示,该 AWG 的阵列波导有 4 段直波导、3 段弯曲波导交替相接,其输入端和输出端为自由传输区域(FPR),三段结构波导中第 I 和第 III 部分完全相同,只是相互旋转了  $\pi + \Omega$  角度,所以相邻阵列波导的长度差由第 II 部分决定。这种 S 型结构显著提高了弯曲波导的弯曲半径,大大降低弯曲损耗,使直波导和弯曲波导中的有效折射率差显著降低,也就降低了阵列波导间的相位误差。但是,这种结构 AWG 的不同阵列波导的弯曲半径依然不相同,随着对器件小型化的要求,器件的弯曲半径势必减小,于是相位误差又将显著出来。

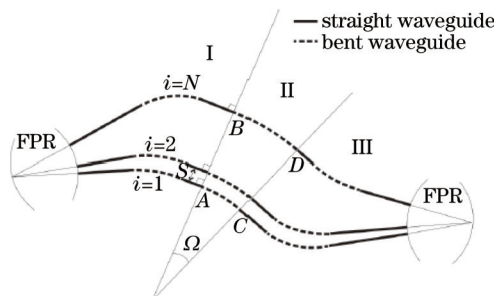


图4 反对称的宽带阵列波导光栅布局示意图

Fig.4 Sketch diagram of the broad-band array waveguide grating with antisymmetric shape

荷兰 Twente 大学目前正进行改进型的反对称 AWG 芯片的研制<sup>[11]</sup>,并取得了初步的结果,Ismael 等<sup>[12]</sup>在 800~920 nm 的范围内,采用 SiON/SiO<sub>2</sub> 光波导实现了 55 通道的 AWG,并制成微型拉曼光谱仪,中心波长处插入损耗为 1.1 dB,边缘波长处插入损耗为 2 dB,相邻波导间串扰为 -10.5 dB。AWG 器件结构和测试结果如图 5 所示。该结构所有阵列波导的弯曲部分的弯曲半径都相同,旨在避免或降低器件的相位误差,以保证微型拉曼光谱仪的测量可靠性和测量精确度。

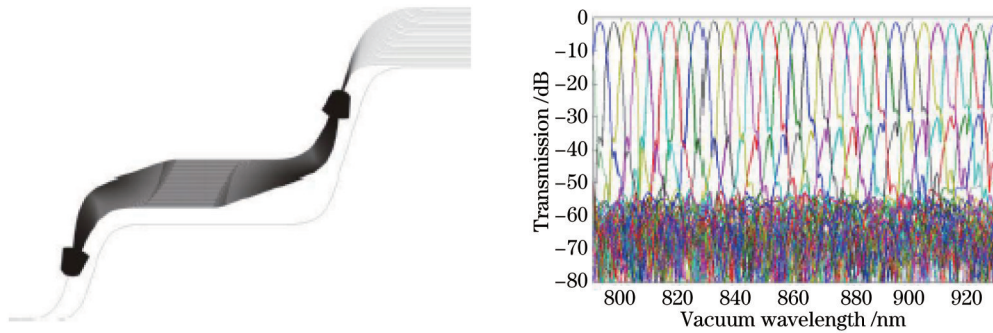


图5 荷兰Twente大学报道的55通道AWG光谱仪分光芯片结构和测试结果

Fig.5 Structure of a 55-channel AWG spectrometer chip and test results reported by the Twente University

### 3.2 采用AWG作为分光芯片的微型拉曼光谱仪研究进展

尤其值得注意的是2011年出现了针对微型拉曼光谱仪的AWG方案,说明采用经改进的新型AWG作为微型拉曼光谱仪的分光芯片的方案是可行的。荷兰Twente大学的Ismail等<sup>[13]</sup>指出,他们已经初步实现了利用紧凑型AWG器件作为分光芯片的微型拉曼光谱仪的制备,其中该AWG分光芯片工作的中心波长为901 nm,自由光谱区的范围为890~912 nm,分辨率为0.2 nm,相邻波导间的串扰大约在-10 dB,中心波长处的插入损耗测量结果约为2 dB。采用SiON/SiO<sub>2</sub>光波导实现了55通道的AWG,并制成微型拉曼光谱仪,成功用于人体牙齿病变的非接触、快速测定,如图6,7所示<sup>[13]</sup>。但该AWG芯片仍为对称型的传统马蹄型布局,会不可避免地引入相位误差。

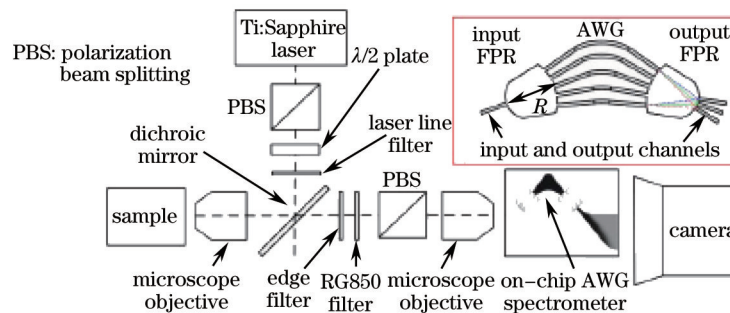


图6 采用AWG作为分光芯片的微型拉曼光谱仪的实验示意图

Fig.6 Experimental setup of the polarized Raman tests using AWG as the spectrometer chip

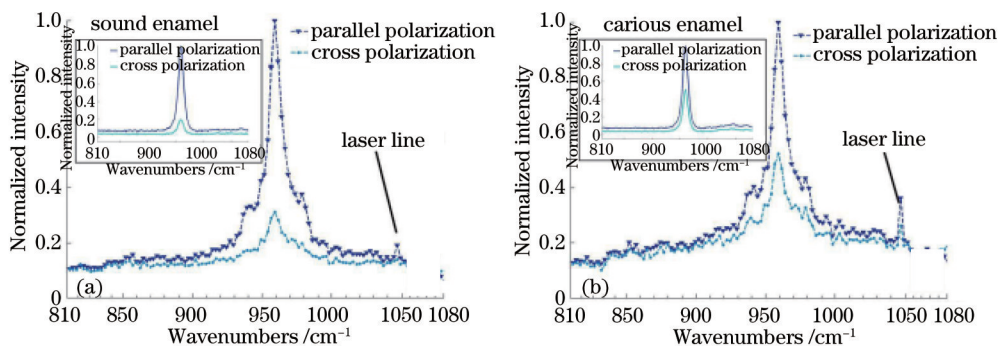


图7 采用AWG作分光芯片制作的微型拉曼光谱仪用于人牙齿测试。(a)健康的牙齿;(b)病变的牙齿

Fig.7 Teeth test using micro Raman spectrometer with AWG as its spectroscopic chip. (a) Spectra of the sound tooth; (b) spectra of the carious tooth

2011年,荷兰阿姆斯特丹大学的Nguyen等<sup>[14]</sup>采用氮氧化硅制作的阵列波导光栅作为分光芯片,设计且制作出了一台微型光谱仪,并把该微型光谱仪用于频域光学相干断层成像(SD-OCT)。作为核心元器件的阵列波导光栅尺寸为30 mm×25 mm,其中心波长是1300 nm,自由光谱区约为78 nm。用该光谱仪测试的结果表明,其纵向分辨率达到了19 μm,成像的最大深度达到了1 mm。图8是用AWG作为分光芯片的频域光学相干断层成像系统。

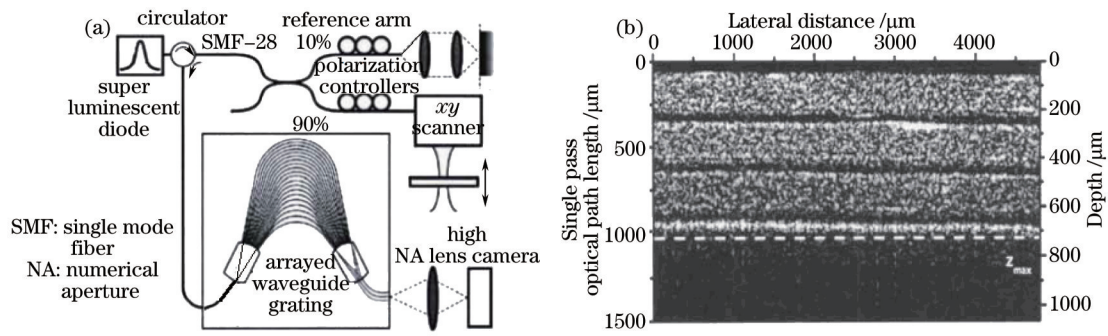


图8 (a) 含有阵列波导光栅的频域光学相干断层成像系统; (b) 测试的三层断层光学相干图像

Fig.8 (a) SD-OCT system containing the AWG; (b) test SD-OCT image

2012年比利时的Yebo课题组利用16信道的阵列波导光栅作为分光芯片的微型光谱仪制作了一个用来测试乙醇浓度的微环谐振(MRR)传感器<sup>[15]</sup>。该阵列波导光栅的波长间隔为200 GHz、串扰约为-17 dB、插入损耗约为-3 dB,如图9所示。整个微型光谱仪器可以测量的乙醇的蒸气分子浓度范围为 $100\sim 1000\times 10^{-6} \text{ L}^{-1}$ 。

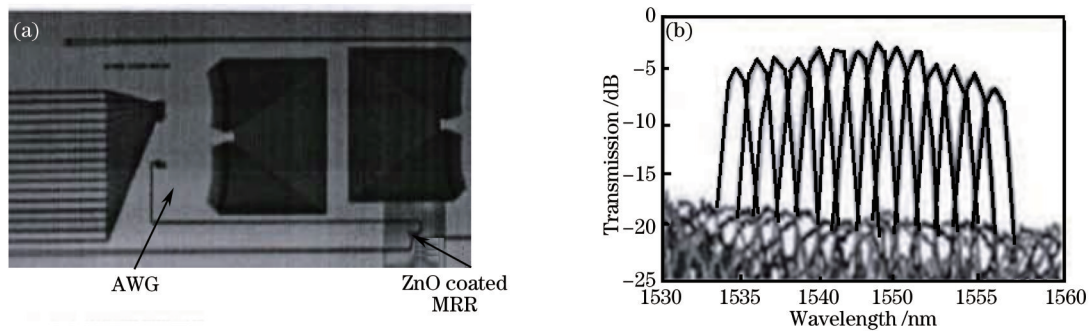


图9 (a) 微环传感器的显微镜影像图; (b) 阵列波导光栅芯片的传输光谱

Fig.9 (a) Microscope photograph of the microring resonator; (b) transmission spectra of the AWG chip

Cvetojevic等<sup>[16-18]</sup>提出了集成多模式光子光谱仪器的定义,其结构如图10(a)所示,该结构中含有的阵列波导光栅的输出波导被切除掉,在输出的平板波导横断面上形成了重迭的光谱图像,并且在纵向根据波长进行色散,最后在CCD上观察到连续的光谱。他们利用阵列波导光栅作为分光芯片制作的微型光谱仪器,用于大气分子的观测,成功观测到了OH发射谱线[如图10(b)所示]。

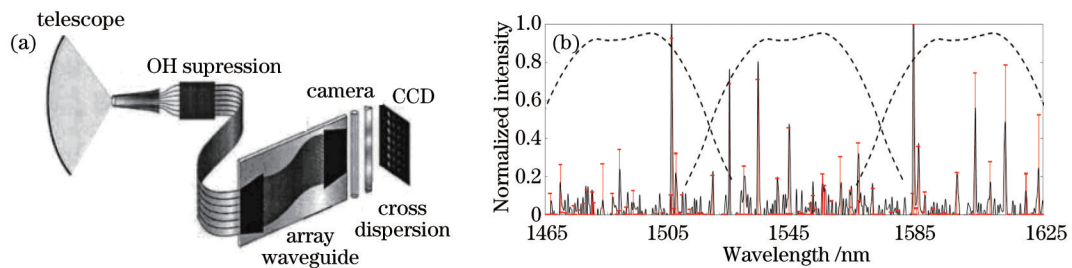


图10 悉尼大学用AWG芯片制作的用于大气分子观测的光谱仪结构和测试结果。(a) 集成多模式光子光谱仪器结构图;

(b) 测试的大气分子中OH发射谱

Fig.10 Structure of the spectroscopy using AWG as the spectral chip used for the observation of atmospheric molecules and the test results. (a) Structure of the integrated multimodal photon spectroscopy; (b) OH spectrum in atmospheric molecules

我国关于微型拉曼光谱仪器的研究起步相对较晚,但是国内很多高校和研究机构都积极开展了该领域的研究工作,且取得了阶段性的研究成果<sup>[19]</sup>。厦门大学Li等<sup>[1]</sup>发表了壳层隔绝纳米粒子增强拉曼光谱技术(SHINERS),该技术能便捷地鉴别出物质的种类,灵敏度很高,并且具有非常好的普适性和稳定性,如图11所示。在一个实验实例中,通过照射橙子表皮,能在较短的几秒钟时间内检测出农药的残留<sup>[1]</sup>,该技术为我国开展检测微弱信号的微型拉曼光谱仪器提供了良好的技术支撑。

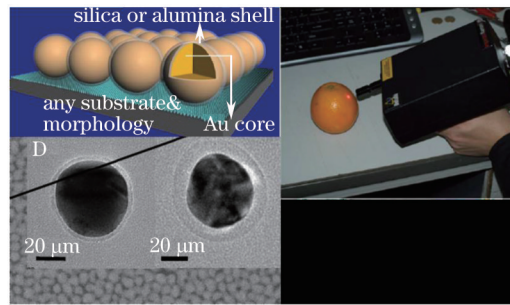


图 11 壳层隔绝纳米粒子增强拉曼技术及应用

Fig.11 Shell-isolated nanoparticle-enhanced Raman spectroscopy and its application

国内目前研制微型拉曼光谱仪器的技术路线大约分为三种:以中国科学院长春光学精密机械与物理研究所<sup>[20-21]</sup>、中国科学院光电技术研究所、重庆大学等为代表进行了基于MEMS技术的分光芯片的探索,主要形成了采用MEMS的可变光栅或可动透镜和采用F-P腔分光仪芯片两种主要工艺路线;以厦门大学程亚琴<sup>[22]</sup>采用阵列波导光栅作为微型拉曼光谱仪的分光芯片的技术路线,其1×41通道AWG版图及测试结果如图12所示。尤其是2013年厦门大学设计出了波长范围在800~1000 nm、分辨率在0.5 nm的阵列波导光栅分光芯片,并进行了相应的工艺实验研究,分别采用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)技术来制作氮氧化硅AWG和利用聚合物材料制备AWG,给出了器件制作的工艺流程、实验参数和相应的实验结果,搭建测试平台,对AWG器件进行了测试,获得的AWG器件的插入损耗为-2.51 dB,但器件插入损耗的均匀性较差。本课题组也在用于微型拉曼光谱仪分光芯片的AWG的仿真设计做了相应的探索性工作<sup>[23]</sup>。然而,阵列波导光栅及其作为分光芯片的微型拉曼光谱仪走向实用化,商业化还有很长的路要走,所遇到的困难一是器件工作波长较宽,需要器件通道数更多,器件更复杂,制作难度加大;二是工作波长从光通信波段1550 nm附近减小到中心波长为1000 nm以下,使得器件的波导尺寸更加减小<sup>[23]</sup>,这样器件的工艺制作难度无疑也会明显加大。在工艺制作方面,可以采取一些新的技术手段如采用纳米压印技术制作光波导以提高器件的成品率。

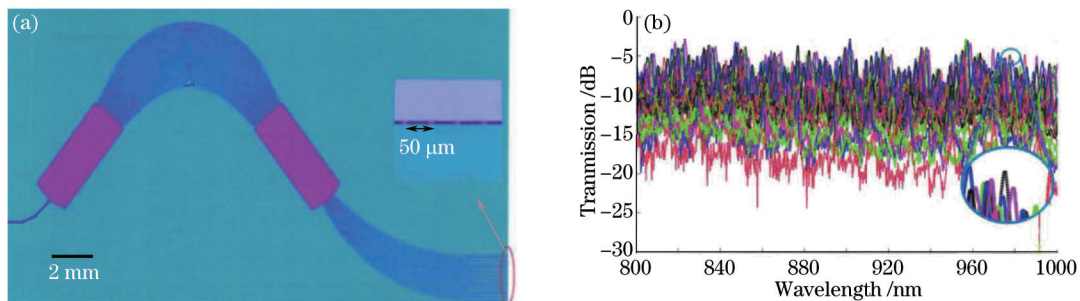


图 12 厦门大学程雅琴等人制作的1×41通道AWG版图及其测试结果

Fig.12 Schematic diagram 1×41 AWG and its testing results by Cheng Yaqin of Xiamen University

## 4 讨 论

阵列波导光栅随着通道数和级次的增大,其器件尺寸也会相应增大,这对于应用于微型拉曼光谱仪分光芯片追求器件的小型化是不利的,并且级次非常高的AWG,相位误差和工艺制作的非均匀性会凸显。为了限制这些相位误差,器件的尺寸必须减小,即弯曲半径需取更小的数值,但这样在另一方面又造成了插入损耗的增加。在传统的马蹄形AWG中,这样做既增大了损耗也增大了相位误差,而在等弯曲半径的AWG器件中,仅仅增大了损耗,但却大大减小了器件尺寸和降低了传统马蹄形AWG带来的相位误差。本文根据Ismail等设计经验,拟采用如图13所示的AWG的具有相同弯曲半径的阵列波导版式结构,同样在每个阵列波导上选取相同的弯曲波导的半径和长度。此方案也可以从根本上消除相位误差,并且结构更为紧凑。其中AWG器件的第*i*个波导的中间部分,连接着第*i*个波导的左右两个直线段部分,直线段部分的长度差(与第1个波导相比)为 $(i-1)\Delta L/2$ ,所有阵列波导的弯曲波导的弯曲角度为 $\varphi = 2\arctan(\Delta L/2S)$ 。

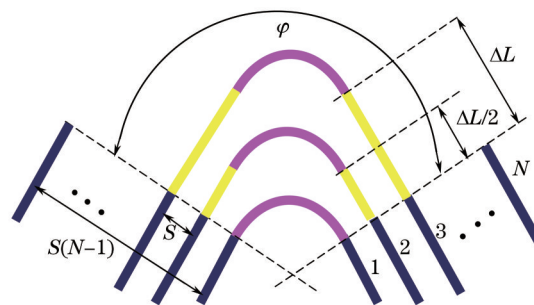
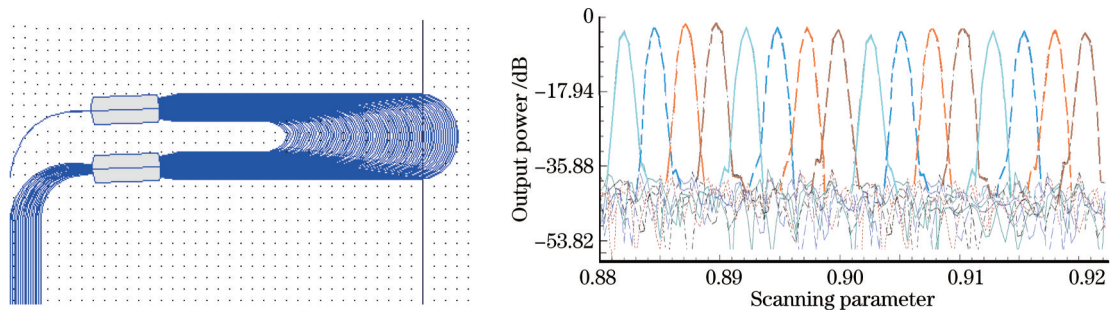


图13 具有相同弯曲半径的小型化AWG的几何构型

Fig.13 Geometric configuration of the miniature array waveguides using the same bending radius

根据用于微型拉曼光谱仪分光芯片的要求,设计了一个 $1 \times 16$ 的AWG,其阵列波导取等弯曲半径为 $2100 \mu\text{m}$ ,中心波长取 $0.9 \mu\text{m}$ ,输出波导间隔 $\Delta\lambda = 2.5 \text{ nm}$ ,阵列波导数目为71,平板波导长度为 $1000 \mu\text{m}$ 。模拟结果表明插入损耗均匀性较好,在 $-3.5 \text{ dB} \sim -4 \text{ dB}$ 。具体结构和输出光谱如图14所示。

图14 设计的 $1 \times 16$  AWG及模拟结果Fig.14 Designed  $1 \times 16$  AWG and the beam propagation simulation results

## 5 结束语

阵列波导光栅用于微型拉曼光谱仪分光芯片,对于开发便携、廉价、精确的,可用于食品安全领域的微型拉曼光谱仪具有广阔的应用前景,但是AWG分光芯片的研制在器件结构到工艺制作的改进过程中受到各方面的限制。随着用于分光芯片AWG器件研究进程的加快,必将成为该技术领域的一个研究重点。当前,国内外都在试图寻求AWG器件展宽带宽、降低器件的相位误差,以及器件制作中降低插入损耗和串扰的有效途径。采用新的器形设计,可以有效降低器件的相位误差。在材料选择、工艺手段研究方面做一些深入的研究工作,必将大大降低器件插入损耗和串扰,获得实用化的用于微型拉曼光谱仪的AWG分光芯片。

## 参考文献

- 1 J Li, Y Huang, Y Ding, *et al.*. Shell-isolated nanoparticle-enhanced Raman spectroscopy[J]. Nature, 2010, 464: 392-395.
- 2 An Yan, Sun Qiang, Piao Renguan, *et al.*. Optical system of the probe for a micro-Raman spectrometer [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(3): 032304.  
安 岩, 孙 强, 朴仁官, 等. 用于微型拉曼光谱仪的外光路光学系统[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(3): 032204.
- 3 Wen Zhiyu, Chen Gang, Wang Jianguo. The project and simulation of a compositive miniature spectrum instrument based on the array of Fabry-Perot cavity[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2006, 26(10): 1955-1959.  
温志渝, 陈 刚, 王建国. 基于Fabry-Perot腔阵列的集成化微型光谱仪方案及模拟[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(10): 1955-1959.
- 4 Yang B, Zhu Y, Jiao Y, *et al.*. Compact arrayed waveguide grating devices based on small SU-8 strip waveguides[J]. J Lightwave Technol, 2011, 29(13): 2009-2014.
- 5 Changming Chen, Hui Wang, Lei Wang, *et al.*. Athermal polarization-independent 49-channel UV curable all-polymer arrayed waveguide grating (AWG) multiplexer[J]. Optik, 2014, 125(1): 521-525.
- 6 Daoxin Dai, Zhi Wang, Jared F Bauters, *et al.*. Low-loss  $\text{Si}_3\text{N}_4$  arrayed-waveguide grating (de) multiplexer using nano-core optical waveguides[J]. Opt Express, 2011, 19(15): 14130-14136.

- 7 P Cheben, J H Schmid, A Del age, *et al.*. A high-resolution silicon-on-insulator arrayed waveguide grating microspectrometer with submicrometer aperture waveguides[J]. *Opt Express*, 2007, 15(5): 2299–2306.
- 8 K Kodate, Y Komai. Compact spectroscopic sensor using an arrayed waveguide grating[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2008, 10(4): 044011.
- 9 M K Smit, C Van Dam. PHASAR-based WDM-devices: Principles, design and applications[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 1996, 2(2): 236–250.
- 10 R Adar, C H Henry, C Dragone, R C Kistler, *et al.*. Broad-band array multiplexers made with silica waveguides on silicon[J]. *J Lightwave Technol*, 1993, 11(2): 212–219.
- 11 N Ismail, Fei Sun, Gabriel Sengo, *et al.*. Improved arrayed-waveguide-grating layout avoiding systematic phase errors [J]. *Opt Express*, 2011, 19(9): 8781–8794.
- 12 N Ismail, A C Baclig, P J Caspers, *et al.*. Design of low-loss arrayed waveguide gratings for applications in integrated Raman spectroscopy[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2010: CFAT.
- 13 N Ismail, L P Choo-Smith, K W rhoff, *et al.*. Raman spectroscopy with an integrated arrayed-waveguide grating[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(23): 4629–4631.
- 14 Nguyen V D, Akca B I, W rhoff K, *et al.*. Spectral domain optical coherence tomography imaging with an integrated optics spectrometer[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(7): 1293–1295.
- 15 Yebo N A, Bogaerts W, Hens Z, *et al.*. On-chip interrogation of a silicon-on-insulator microring resonator-based ethanol vapor sensor with an arrayed waveguide grating (AWG) spectrometer[C]. *SPIE*, 2012, 8264: 8264P.
- 16 Cvetojevic N, Lawrence J, Ellis S C, *et al.*. Characterization and on-sky demonstration of an integrated photonic spectrograph for astronomy[J]. *Opt Express*, 2009, 17(21): 18643–18650.
- 17 Bland-Hawthorn J, Lawrence J, Robertson G, *et al.*. PIMMS: Photonic integrated multimode microspectrograph[C]. *SPIE*, 2010, 7735: 7735N.
- 18 Lawrence J, Betters C, Bland-Hawthorn J, *et al.*. Development of an array-waveguide grating astronomical spectrograph [C]. *Frontiers in Optics*, 2010: FTUU4.
- 19 Cui Yongsheng, Yin Yu, Wu Yulin, *et al.*. Research of high power and stable laser in portable Raman spectrometer based on SHINERS technology[C]. *SPIE*, 2013, 8910: 89101J.
- 20 Hao Peng, Wu Yihui, Zhang Peng, *et al.*. A micro-silicon multi-slit spectrophotometer based on MEMS technology[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(6): 1713–1716.  
郝 鹏, 吴一辉, 张 鹏, 等. 一种基于MEMS微硅多狭缝分光光度计[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(6): 1713–1716.
- 21 Wang Bo, Liang Zhongzhu, Kong Yanmei, *et al.*. Design and fabrication of micro multi-mirrors based on silicon for micro-spectrometer[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(2): 907–912.  
王 波, 梁中翥, 孔延梅, 等. 用于微型光谱仪的硅基多级微反射镜设计与制作研究[J]. *物理学报*, 2010, 59(2): 907–912.
- 22 Cheng Yaqin. Research on Waveguide Grating AWG Spectral Chip Used in Miniature Raman Spectrometer[D]. Xiamen: Xiamen University, 2013: 6.  
程亚琴. 用于微型拉曼光谱仪的阵列波导光栅AWG分光芯片研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2013: 6.
- 23 Yingchao Xu, Qingna Wang, Wenzhang Zhu. Design and simulation of arrayed waveguide grating for miniature Raman spectrometer[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 644–650: 3588–3592.

栏目编辑: 王晓琰